



ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

3
ВЫПУСК
2017

— МОСКВА —

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Атомная энергетика – одна из немногих отраслей российской экономики, занимающих лидирующие позиции в мировом масштабе. Атомные электростанции и энергоблоки, построенные советскими и российскими специалистами, обеспечивают бесперебойную выработку электроэнергии не только в России, но и во многих других странах мира, внося тем самым свой весомый вклад в энергоснабжение их национальных экономик. И в настоящее время Государственная корпорация «Росатом», сконцентрировавшая значительный производственный и научный потенциал российской атомной энергетики, НИЦ «Курчатовский институт», другие институты и предприятия ядерно-энергетического комплекса страны продолжают успешно разрабатывать и продвигать на мировой рынок передовые отечественные технологии и разработки в области мирного использования атомной энергии.

В этом выпуске Энергетической политики» опубликованы статьи и результаты исследований ведущих российских ученых и специалистов ядерной энергетике по актуальным проблемам и вызовам, стоящим перед отраслью, стратегии дальнейшего технологического развития ядерной энергетической системы с реакторами деления и синтеза, двухкомпонентной ядерной энергетике на базе реакторов на быстрых нейтронах, внедрению передовых информационных технологий в развитие атомного энергетического комплекса, АЭС малой мощности, анализу конкурентных преимуществ атомной энергетике и др.

Редколлегия журнала осознанно пошла на публикацию различных мнений авторов по поводу запасов природного урана, перспектив развития атомной энергетике в целом и ее базовых технологий – гибридного и теплового реакторов. Полагаем, что опубликованные материалы будут представлять несомненный интерес и полезны не только для специалистов атомной энергетике, но и всего энергетического комплекса в целом.

DEAR READERS!

The nuclear power industry is one of few Russian economy sectors leading internationally. Nuclear power stations and power units built by Soviet and Russian engineers ensure faultless energy generation not only in Russia, but also in other countries across the world thus contributing significantly to power supply as part of their national economies. Currently, the State Atomic Energy Corporation Rosatom that draws together a substantial production and scientific potential of the Russian nuclear power industry, National Research Center «Kurchatov Institute», other institutes and plants constituting the Russian nuclear power complex continue to develop and market globally domestic state-of-the-art technologies and solutions focused on peaceful uses of atomic energy.

This «Energy Policy» issue presents articles and research findings by leading Russian scientists and nuclear energy specialists on urgent problems and challenges facing the industry, the strategy of further technological development of the nuclear power system with fusion-fission reactors, two-component nuclear power industry based on fast-neutron reactors, introduction of advanced information technologies in nuclear energy complex development, small nuclear power plants, analysis of nuclear energy competitive advantages, etc.

The editorial Board consciously took the publication of various authors' opinions regarding the reserves of natural uranium, the prospects of nuclear energy development in General and its underlying technologies – hybrid and thermal reactors. We suppose that the materials published will be of real interest and use to not only nuclear energy specialists, but also the energy complex as a whole.



ОБЩЕСТВЕННО-ДЕЛОВОЙ, НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

Выпуск **3** • 2017

Издается с 1995 года

Редакционная коллегия:

В.В. Бушуев – д.т.н., профессор, генеральный директор ИЭС, главный редактор

Н.И. Воронин – д.т.н., чл.-корр. РАН, научный руководитель ИСЭМ СО РАН, зам. главного редактора

А.М. Мастепанов – д.э.н., профессор, зам. директора ИЭС, зам. главного редактора

А.М. Белогорьев – отв. секретарь, зам. директора по энергетическому направлению, Фонд «Институт энергетики и финансов»

А.И. Громов – к.г.н., Фонд «Институт энергетики и финансов», директор по энергетическому направлению

А.Н. Дмитриевский – д.г.-м.н., академик РАН, научный руководитель ИПНГ РАН

В.А. Крюков – д.э.н., чл.-корр. РАН, зам. директора ИЭОПП СО РАН

Ю.Н. Кучеров – д.т.н., начальник департамента технического регулирования ОАО «СО ЕЭС»

А.А. Макаров – д.э.н., академик РАН, советник РАН

О.С. Попель – д.т.н., зам. директора ОИВТ РАН

В.В. Саенко – к.э.н., ИПП РАН

С.М. Сендеров – д.т.н., зам. директора ИСЭМ СО РАН

Ю.А. Станкевич – зам. председателя Комитета РСПП по энергетической политике и энергоэффективности

Е.А. Телегина – д.э.н., чл.-корр. РАН, декан факультета международного энергетического бизнеса РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина

Ю.К. Шафраник – д.э.н., председатель Совета директоров ЗАО «МНК «СоюзНефтеГаз»

А.Б. Яновский – д.э.н., зам. министра энергетики РФ

Учредители журнала «Энергетическая политика»: ЗАО «Глобализация и Устойчивое развитие», Институт энергетической стратегии, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН
Издатель журнала ИЦ «Энергия».

Адрес редакции: 125009, Москва, Дегтярный пер., 9, оф. 011
Телефон ред.: (495) 229-42-41 (доб. 230)
E-mail: ies2@umail.ru; krilov@guies.ru
Web-site: <http://www.energystrategy.ru>
Выходит 6 раз в год

Ведущий редактор **С.И. Крылов**
Компьютерная верстка **В.М. Щербаков**
Отпечатано в типографии Onebook

Подписано в печать 26.06.2017
Формат 60х84/8
Бумага офсетная. Печать офсетная
Усл. печ. л. 14,88. Уч. изд. л. 16
Тираж 500 экз.
Заказ № 29 (67/02-99) ИЭС № 371

© ЗАО «Глобализация и Устойчивое развитие», Институт энергетической стратегии, 2017
Журнал «Энергетическая политика» входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК.
При перепечатке материалов ссылка на издание обязательна.



ПОБЕДИТЕЛЬ VII ВСЕРОССИЙСКОГО
ЖУРНАЛИСТСКОГО КОНКУРСА
«ЛУЧШАЯ ПУБЛИКАЦИЯ
ПО ПРОБЛЕМАМ ТЭК РОССИИ 2001 года»

СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

NUCLEAR ENERGY: NEW CHALLENGES AND STRATEGIC PRIORITIES

- В.В. Ивантер, В.В. Семикашев.** Роль атомной промышленности в экономике страны и стоящие перед ней вызовы 3
- V.V. Ivanter, V.V. Semikashev.** Nuclear industry role in national economy and challenges it faces
- Е.П. Велихов, М.В. Ковальчук, В.И. Ильгисонис, В.В. Игнатьев, В.Ф. Цибульский, Е.А. Андрианова.** Эволюционное развитие атомной энергетики в направлении крупномасштабной ядерной энергетической системы с реакторами деления и синтеза 12
- E.P. Velikhov, M.V. Kovalchuk, V.I. Ilgisonis, V.V. Ignatyev, V.F. Tsibulskiy, E.A. Andrianova.** Transformational growth of nuclear power industry towards large-scale nuclear energy system with fusion-fission reactors
- Е.О. Адамов, С.Д. Соловьев.** Ядерная энергетика – вызовы и решение проблем 21
- E.O. Adamov, D.S. Solovyov.** Nuclear power industry: challenges and problem solution
- В.В. Иванов, А.В. Путилов.** Цифровое будущее: следующий шаг в развитии атомных энергетических технологий 31
- V.V. Ivanov, A.V. Putilov.** Digital future: the next step in the development of nuclear power technologies

П.Н. Алексеев, А.Ю. Гагаринский, Ю.М Семченков. Стратегия развития двухкомпонентной ядерной энергетики ..	43
<i>P.N. Alekseev, A.Yu. Gagarinsky, Yu.M. Semchenkov.</i> Strategy for development of two-component nuclear power industry	
Е.В. Муравьев. Концепция двухкомпонентной ядерной энергетики России в рамках стратегии развития	49
<i>E.V. Muravyev.</i> The concept of two-component nuclear power industry in Russia as part of the development strategy	
С.А. Субботин, Т.Д. Щенетина. Система атомных станций малой мощности как интегрирующий фактор ТЭК	60
<i>S.A. Subbotin, T.D. Shchetina.</i> Small nuclear power plant system as an integrating factor of the fuel and energy complex	
Ф.В. Веселов, А.С. Макарова, Т.В. Новикова, Д.А. Толстоухов, П.В. Атюнюкова. Конкурентные перспективы АЭС в формировании низкоуглеродного профиля российской электроэнергетики	68
<i>F.V. Veselov, A.S. Makarova, T.V. Novikova, D.A. Tolstoukhov, P.V. Atnyukova.</i> NPP competitive prospects as to developing low carbon profile of Russian energy industry	
Б.И. Нигматулин. Прогноз мирового электропроизводства на АЭС на 2015-2050 гг.	78
<i>B.I. Nigmatulin.</i> Forecast of global electricity production at nuclear power plants for 2015-2050	
С.З. Жизнин, В.М. Тимохов. Дипломатия в ядерной энергетике	90
<i>S.Z. Zhiznin, V.M. Timokhov.</i> Diplomacy in nuclear energy	

УДК 621.039

В.В. Ивантер, В.В. Семикашев¹

РОЛЬ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ЭКОНОМИКЕ СТРАНЫ И СТОЯЩИЕ ПЕРЕД НЕЙ ВЫЗОВЫ

Статья представляет собой обзор состояния и экспертное мнение авторов о роли атомной промышленности в экономике страны. Описываются текущие проблемы, вызовы и оценки конкурентоспособности Госкорпорации «Росатом» на различных рынках. Рассмотрены перспективы развития отрасли как с точки зрения участия в экономике и энергетике страны и мира, так и в части влияния на технологическое развитие отечественной экономики.

Ключевые слова: атомная промышленность, ГК «Росатом», АЭС, Россия, выработка электроэнергии на АЭС.

Текущее состояние и структура отрасли

В настоящее время «Росатом» в статусе госкорпорации объединяет почти весь комплекс предприятий атомной промышленности. Также в ближний круг госкорпорации входят еще ряд предприятий, научных центров и вузов (например, Курчатовский институт, НИЯУ МИФИ), для которых «Росатом» является важнейшим партнером. Косвенно госкорпорация принимает участие и в развитии ряда городов, где расположены объекты атомной отрасли.

В современном виде госкорпорация была сформирована после 2007 г., когда была преобразована из федерального агентства. С тех пор произошла реструктуризация корпоративной структуры и модернизация бизнес-процессов. В результате Госкорпорацию «Росатом» можно представить в виде нескольких взаимосвязанных блоков. Наиболее крупный блок – ядерно-энергетический комплекс, который включает в себя предприятия:

- по добыче и обогащению урана (Урановый холдинг «АРМЗ», объединяющий российские добывающие активы, и канадская компания Uranium one, объединяющая зарубежные добывающие активы, характеризующиеся низкой себестоимостью и высокой конкурентоспособностью);
- производству топлива (Топливная компания «ТВЭЛ»);

- проектированию, строительству, инжинирингу, производству и поставке оборудования для АЭС;
- эксплуатации атомных электростанций (Концерн «Росэнергоатом», который управляет и эксплуатирует 10 действующих в России АЭС).

Другими блоками и направлениями деятельности являются:

- обеспечение ядерной и радиационной безопасности в России, включая вопросы обращения с радиоактивными отходами (РАО) и отработанным ядерным топливом (ОЯТ), а также вывод АЭС из эксплуатации;
- прикладная и фундаментальная наука в ядерной сфере. Отдельно стоит выделить проект «Прорыв», в рамках которого сосредоточены разработки наиболее инновационных технологий, в том числе реакторов на быстрых нейтронах. В ГК «Росатом» разрабатываются проекты новых энергоблоков: промышленного БН-1200 и опытно-промышленного БРЕСТ-300;
- эксплуатация гражданского ядерного ледокольного флота (ФГУП «Атомфлот», эксплуатирующий 5-6 атомных ледоколов);
- новые виды бизнеса, включая возобновляемую энергетику и ядерную медицину;
- ядерно-оружейный комплекс.

¹ Виктор Викторович Ивантер – директор Института народнохозяйственного прогнозирования (ИНП) РАН, д.э.н., академик, e-mail: vvivanter@ecfor.ru;

Валерий Валерьевич Семикашев – заведующий лабораторией прогнозирования ТЭК ИНП РАН, к.э.н., e-mail: vv_semikashv@mail.ru

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Роль Госкорпорации «Росатом» в российской экономике заключается в следующем.

- Это крупный сектор национальной экономики. В нем занято 250 тыс. человек, совокупная выручка – более 820 млрд руб., выплаченные налоги – 196 млрд руб., экспортная выручка – свыше 6 млрд долларов. Также АЭС обеспечивают порядка 18% от всей вырабатываемой электроэнергии в России (все данные за 2015 г.) [2].
- Это один из инновационных центров экономики страны и гарант обеспечения международной конкурентоспособности в сфере высоких и наукоемких технологий.
- Стратегическая роль сектора связана с ядерно-оружейным комплексом и обеспечением ядерной и радиационной безопасности. Кроме того, по большому счету, закрытие АЭС ни в России, ни в мире не реализовывалось, и в практике эксплуатирующих компаний отсутствуют достаточные фонды на закрытие станций и рекультивацию местности. Поэтому в ближайшие десятилетия только стабильно работающая атомная отрасль и эффективная, прибыльная госкорпорация могут обеспечить достаточные объемы средств для безопасного функционирования действующих и закрытых ядерных объектов.

Ситуация с международной конкуренцией на рынке строительства АЭС

Важным и большим направлением является международное сотрудничество. Здесь «Росатом» представляет Россию в международном агентстве по атомной энергии МАГАТЭ, в рамках обязательств России по международным договорам и в сооружении опытного исследовательского термоядерного реактора ИТЭР во Франции, а также занимается продажей АЭС, топлива и других услуг за рубеж.

Стратегия ГК «Росатом» на внешних рынках состоит в интегрированном предложении, которое включает в себя инженерные решения для всего жизненного цикла АЭС, управление цепочками поставок, финансовое решение, развитие человеческого капитала для отрасли и ар-

гументы в пользу АЭС для общественного мнения, создание регулирования ядерной инфраструктуры в стране, а также решения по бэкэнду и экологии. В настоящее время «Росатом» имеет самый крупный пакет заказов на строительство АЭС за рубежом – до 36-ти энергоблоков в разной стадии законтрактованности, а совокупный портфель зарубежных заказов на период до 10 лет составляет сумму свыше 110 млрд долл. [2], имеет современный референтный продукт (энергоблоки сооруженные за рубежом, без чего полноценно претендовать на зарубежный рынок невозможно), достаточно успешно конкурирует с другими поставщиками энергии как традиционной энергетики, основанной на угле и газе, так и возобновляемой.

Основным продуктом является АЭС на базе энергоблока с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200-АЭС-2006. Это реакторы поколения 3+ (с повышенной «постфукусимской» защитой). Данный продукт характеризуется высокой степенью безопасности, наличием референтности и относительно невысокими удельными капиталовложениями (в среднем для развивающихся стран можно оценить в диапазоне 3-5 тыс. долл. за кВт установленной мощности при оценках строительства АЭС другими корпорациями в западных странах на уровне 5-10 тыс. долл. за кВт).

Кроме того, «Росатом» прорабатывает варианты сооружения АЭС малой и средней мощности с другими реакторными установками, но большинство экспертов в сфере энергетики склоняются к признанию таких АЭС неконкурентоспособными на большинстве рынков.

Другим важнейшим продуктом отечественной атомной промышленности для мирового рынка является поставка ядерного топлива и оказание услуг по обогащению урана, где компания «ТВЭЛ» является мировым технологическим лидером и характеризуется высокой конкурентоспособностью. Доля «ТВЭЛ» на мировом рынке фабрикации составляет 17%. Совместно с АО «Техснабэкспорт» (компания, занимающаяся производством урана по программе ВОУ-НОУ) контролирует 36% мирового рынка услуг по обогащению урана.

«ТВЭЛ» основной поставщик топлива для реакторов российского производства на отечественном и зарубежных рынках. При этом в ко-

операции с AREVA NP производится топливо для реакторов типа BWR и PWR в Западной Европе. Кроме того, компания является поставщиком компонентов ЯТ для индийских реакторов PHWR. Всего топливом ТК «ТВЭЛ» загружены 78 энергетических блоков. В ближайшей перспективе корпорация ТВЭЛ ставит перед собой задачу существенного расширения своего присутствия на рынке реакторов западного дизайна PWR, а также развития сотрудничества с иностранными компаниями [1].

Важным конкурентным преимуществом ГК «Росатом» на международном рынке является его технологическое лидерство. «Росатом» в своем составе имеет полный цикл ядерных технологий, которые являются передовыми в мировом масштабе. По некоторым направлениям является абсолютным лидером. Это касается технологий обогащения урана и производства ядерного топлива, отдельных направлений материаловедения и уникальный опыт строительства и эксплуатации промышленного реактора на быстрых нейтронах большой мощности на Белоярской АЭС. Действующий реактор на быстрых нейтронах БН-800 позволяет в качестве топлива использовать ОЯТ и перейти к замкнутому ядерному топливному циклу – когда отработавшее топливо в реакторах на тепловых нейтронах (обычные действующие в России и мире реакторы) сможет использоваться в качестве компонента топлива для реактора на быстрых нейтронах. В настоящее время БН-800 использует обычное топливо, но в течение нескольких лет планируется перевод на новое топливо, в котором может применяться отработанное ядерное топливо, что позволит перейти от хранения ОЯТ к его переработке. В других странах (Франция и Китай) не смогут приблизиться до такого уровня развития технологии быстрых реакторов в ближайшие годы.

Предыдущий этап развития госкорпорации (2007-2015 гг.) можно подытожить победой в конкуренции с французскими, американскими и японскими атомщиками. При этом основные конкуренты на международном рынке сооружения АЭС практически потеряли свои позиции.

- Во Франции корпорация AREVA в рамках реструктуризации [3] не смогла создать эффективной структуры для конкуренции на внешних рынках, а также не смогла построить АЭС в Финляндии, на которую выиграла первоначально тендер. В итоге был проведен новый конкурс, в котором победил «Росатом». Сейчас AREVA преобразуется в две компании. Одна будет заниматься топливным циклом, а вторая – атомным машиностроением в сотрудничестве с электрогенерирующей компанией Франции EdF. Учитывая реструктуризацию и отсутствие референтного опыта, французские компании не могут быть конкурентом «Росатому» в среднесрочной перспективе в качестве комплексного поставщика готовых решений по строительству АЭС в зарубежных странах.
- В США корпорация Westinghouse по экономическим причинам² не строит новые атомные энергоблоки в США, а техническую документацию на свой передовой энергоблок AP-1000 передала в Китай, который на основе этого формирует собственный проект для зарубежных поставок. Кроме того, материнская компания Toshiba в 2017 г. начала процесс банкротства Westinghouse, что не может не сказаться на экономических и производственных возможностях компании и, по видимому, приведет к отказу или сокращению числа планируемых к строительству АЭС, которые уже законтрактованы, но так и не начаты [4].
- В Японии после аварии на АЭС «Фукусима» атомная отрасль находится в стагнации и преимущественно будет ориентирована на решение проблем на внутреннем рынке.

В настоящее время руководство «Росатома» видит проблему в конкуренции за 2020-2025 гг. с новыми игроками – Китаем и Южной Кореей [5]. Эти страны сами являются крупными производителями электроэнергии на АЭС, имеют сильную машиностроительную базу и амбиции

² Строительство АЭС в США слишком длительно и дорого – называются оценки в 7-8 тыс. долл. за кВт установленной мощности при 750-2500 долл./кВт.ч в традиционной энергетике.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

выхода на международный рынок со своими АЭС. После завершения строительства и пуска АЭС «Барака» в ОАЭ, которое в настоящее время осуществляет южнокорейская корпорация КЕРСО, Южная Корея будет обладать так называемым референтным опытом строительства за рубежом и сможет по цене успешно конкурировать с «Росатомом». Отчасти это обеспечивается более дешевым проектом реактора и энергоблока (как и у китайцев), и готовностью южнокорейских компаний работать с минимальной рентабельностью. Так, АЭС «Барака», по оценкам, строится с плановой убыточностью до -20% [5]. Через некоторое время ожидается выход на международный рынок и получение референтного опыта и китайцами.

Важным преимуществом обеих стран являются способность конкурировать по цене за счет более дешевого финансирования, чем в России. В нашей стране под зарубежные проекты «Росатом» получает субсидии от Минфина для субсидирования ставки процента по кредитам на строительство АЭС за рубежом. Однако даже с субсидией процентные ставки для «Росатома» будут выше, чем для китайских или южнокорейских компаний, не говоря о риске макроэкономических и финансовых проблем в России, что приведет к сокращению возможности субсидировать процентные ставки для «Росатома».

В результате в перспективе до 2025 г. и далее руководством госкорпорации ставится задача разработки и выведения на рынок нового продукта, который за счет инновационности, технологического превосходства, и желательной экономичности, позволит выиграть конкуренцию у китайских и корейских компаний. Такая задача стоит перед научно-техническим блоком «Росатома».

Перспективы развития атомной энергетики в мире

Атомная энергетика получила свое развитие с 1960-х гг. и до конца 1990-х гг. увеличивала свою роль в мировом энергобалансе (рис. 1) и долю в структуре выработки электроэнергии (рис. 2). Переломным этапом стали аварии в США на АЭС «Три-Май-Айленд» и на Чернобыльской АЭС в СССР. После этого атомная

энергетика развивалась гораздо более умеренными темпами, примерно сохраняя свою долю до 2000-х годов. Падение темпов вводов новых атомных энергоблоков – по сравнению с периодом до аварий упали более чем в 4 раза. И среднегодовой прирост мощности АЭС в мире за период 1990-2010 гг. составил всего 0,8% [6].

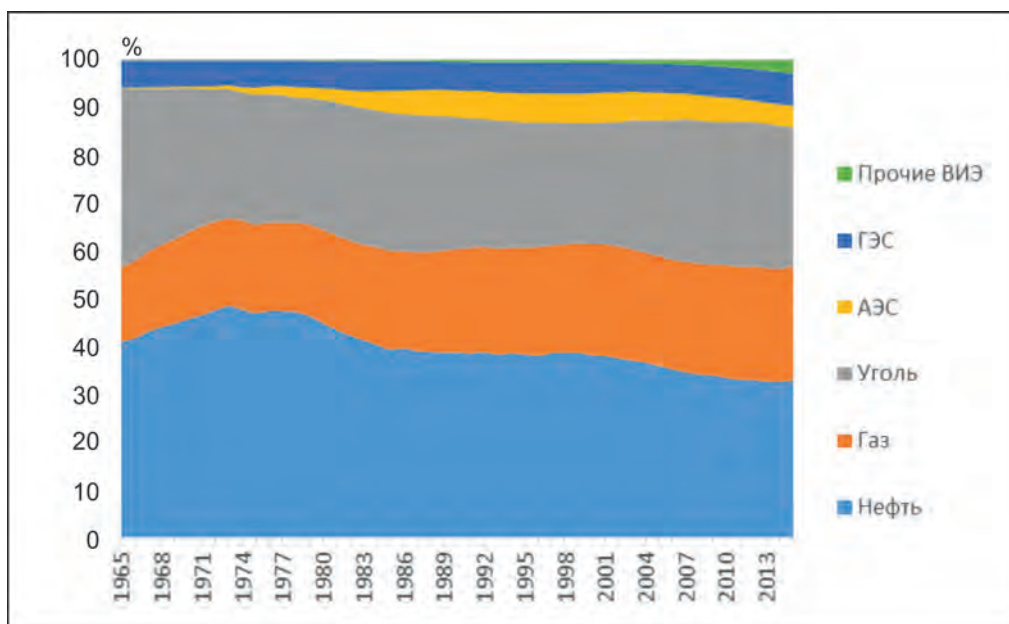
После аварии на АЭС «Фукусима» в Японии в 2011 г. наблюдался некоторый всплеск вводов атомных электростанций (достроить все что можно, прекратить проекты на ранней стадии), а после темпы прироста мощностей ушли в отрицательную плоскость, а выработка электроэнергии стабилизировалась на одном уровне, что приводит к сокращению доли атомной энергетики и в электро-, и в энергобалансе.

В табл. 1. показана динамика выработки энергии на АЭС в ведущих странах мира за последние 15 лет. В мире в целом и примерно в половине из крупных стран-генераторов – это стагнация. Рост наблюдается в России, Южной Кореи, Канаде и 10-тикратный в Китае.

После аварии на АЭС «Фукусима» Германия приняла решение о закрытии АЭС и планомерно идет к этому, а Япония будет, по возможности, стараться заместить их. В США и Канаде по рыночным условиям невыгодно строить новые АЭС и будет происходить сокращение выработки по мере выбытия действующих энергоблоков. Строительство новых АЭС в Великобритании или других странах Европы является сильно политизированным вопросом с неясной экономикой и сможет только заместить работающие в настоящее время мощности.

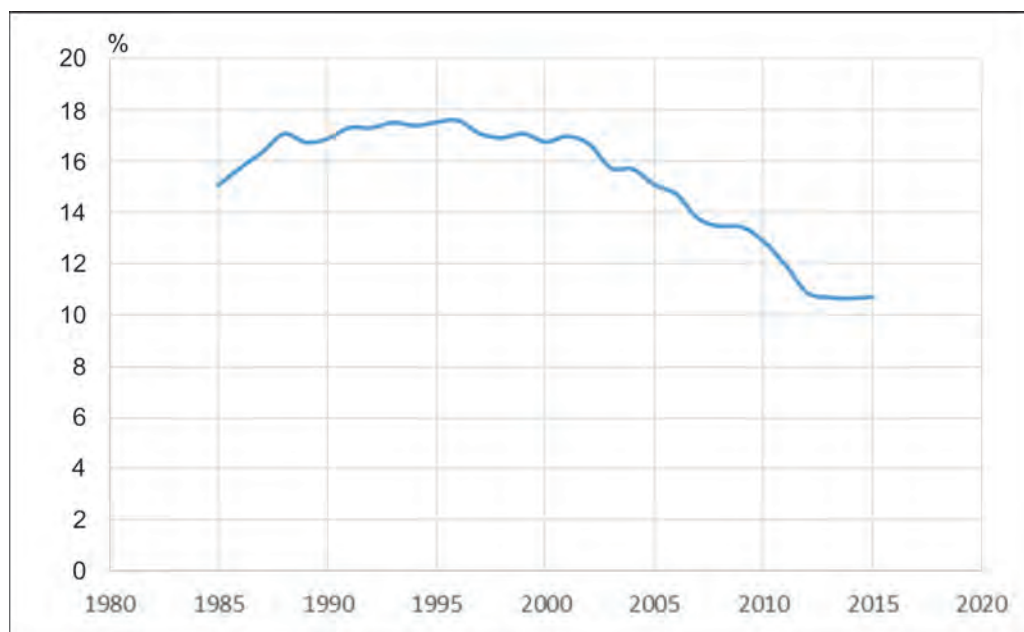
Перспективы атомной энергетики в прогнозах развития мировой энергетики достаточно разнообразны. В различных сценариях прогнозов как нефтегазовых и энергетических компаний (Exxon Mobil, BP, Shell, Statoil), так и профильных агентств и институтов (МЭА, EIA US DOE, ИНЭИ РАН) этот показатель имеет наибольший разброс по сравнению с другими энергоносителями. В большинстве сценариев темпы роста находятся в диапазоне от 1,5 до 2,5% в год, что достаточно высоко. Можно выделить два кластера – около 1,5-1,8% ежегодного прироста выработки электроэнергии на АЭС на прогнозном периоде. В этот кластер попадают инерционные и консервативные прогнозы. Вто-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ



Источник: BP Statistical Review.

Рис. 1. Структура производства энергоресурсов в мире



Источник: BP Statistical Review.

Рис. 2. Доля атомной генерации в производстве электроэнергии в мире

рой кластер – приросты на уровне 2,3-2,5%, а также особые сценарии 450 от МЭА и «Горы» от Shell, где приросты атомной генерации выше 3%. Так как это безуглеродный источник, то ему отводят роль одного из балансировщиков.

Такие темпы роста означают опережающий рост выработки энергии на АЭС по сравнению с ростом энергопотребления, который оценивается в диапазоне 1-1,5%. Прогнозирование атомной генерации основано либо на изучении госу-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Таблица 1

Выработка электроэнергии на АЭС в разных странах мира, Твт·ч

Страны	2000	2010	2015	Доля в мире, %	2015/2000, %
США	794	849	839	33	106
Франция	415	428	437	17	105
Россия	131	170	195	8	150
Китай	17	74	171	7	в 10 раз
Южная Корея	109	149	165	6	151
Канада	72	90	104	4	144
Германия	170	141	92	4	54
Украина	77	89	88	3	113
Великобритания	85	62	70	3	83
Мир всего	2582	2768	2577	100	100

Источник: BP Statistical Review.

дарственных программ развития АЭС в странах, либо на подходе, где АЭС «замыкает» энергобалансы, чтобы уложиться либо в ресурсные ограничения, либо в ограничения на выбросы CO₂, которые приняты в ряде сценариев. Учитывая период низких цен, когда традиционная топливная энергетика более конкурентоспособна и различные риски реализации госпрограмм или готовности энергомашиностроительных комплексов и проблемы ведущих атомных корпораций, скорее всего, реальные темпы прироста выработки атомной энергии окажутся ниже.

В прогнозе мировой энергетики МЭА от 2014 г. в специальном разделе, посвященном перспективам развития атомной энергетики [7], отмечается, что почти все новые АЭС будут построены в странах (на рынках) с регулированием цены на электроэнергию или участием государства в электроэнергетике. При этом 3/4 прироста атомной энергетики будет в развивающихся странах. В том числе более 40% прироста придется на Китай. Еще около 30% на Индию, Южную Корею и Россию.

Вообще одной из ключевых проблем развития атомной энергетики является «нерыночность» этой технологии. Современные АЭС рассчитаны на работу в течение минимум 60 лет и, скорее всего, еще на 20-30 лет может быть продлена эксплуатация. Срок их сооружения занимает от 3-4 до 7-8 лет. Совокупные инвестиции от 5 до 20 млрд долл. и выше. Как было сказано выше, для конкурентных рынков электроэнер-

гии такие объекты не подходят, так как на инвестиционной стадии конкурировать им приходится либо с традиционными топливными электростанциями, возводимыми за 1,5-2 года с существенно меньшими финансовыми и временными затратами, либо с ВИЭ, которые еще меньше. При этом АЭС могут выигрывать конкуренцию по приведенной стоимости (Levelised Cost of Electricity – LCOE) кВт·ч, но размер объекта не позволяет в нормальных условиях инвестировать в них. Поэтому, как было сказано выше, такие объекты возможны только на регулируемых, или с участием государства, рынках электроэнергии, в развивающихся странах, где ожидается значительный и долгосрочный рост спроса, в странах, где АЭС необходима для снижения выбросов CO₂ и в странах, где атомная энергетика уже развита и надо замещать мощности.

Ситуация в России

В России в настоящее время эксплуатируется 10 АЭС, на которых установлены 27 энергоблоков на основе реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000, БН-600, БН-800, РБМК-1000, РБМК-1500, ЭГП-6.

В ближайшее время будет закрыта Билибинская АЭС (48 МВт установленной мощности, реакторы ЭГП-6, расположена в г. Билибино, требует субсидирования в размере 1 млрд руб., которое поступает от «Росатома»). Ее заместит плавучая атомная теплоэлектростанция с рас-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Таблица 2

Характеристика роли атомной энергетики в электроэнергетике России

Показатели	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Установленная мощность электростанций, млн кВт, в т.ч.:	213	215	213	219	230	257
АЭС, млн кВт	20	21	22	24	24	26
Доля АЭС в установленной мощности, %	9%	10%	10%	11%	11%	10%
Производство электроэнергии, млрд кВт·ч, в т.ч.:	1082	860	878	953	1038	1068
АЭС, млрд кВт·ч	118	100	131	149	141	196
Доля АЭС в производстве электроэнергии, %	11%	12%	15%	16%	14%	18%

Источник: Росстат.

положением в г. Певек, который совместно с г. Билибино образует Чаун-Билибинский энергоузел.

Важной задачей является необходимость вывода из эксплуатации энергоблоков с реакторами РБМК, у которых заканчивается срок эксплуатации. Его надо либо продлять, либо постепенно замещать эти энергоблоки. В инерционном сценарии они будут заменяться на современные энергоблоки с реакторами ВВЭР.

В табл. 2 показана динамика изменения установленной мощности АЭС и выработки электроэнергии в России, по данным Росстата. Произошло увеличение и установленной мощности, и выработки, что увеличило долю АЭС в балансе электроэнергии до 18%.

Согласно проекта Энергостратегии до 2035 г. (ЭС-2035) [8] к 2025 г. предполагается рост выработки атомной электроэнергии и увеличение ее доли на 1-1,5 п.п., а затем стабилизация этого показателя. При этом в перспективе до 2035 г. произойдет рост установленной мощности на 30-40%, а также постепенное обновление всех АЭС с переводом их на современные блоки.

Ранее, в 2008-2010 гг., активно обсуждалось и в ряде документов предполагалось еще более обширное развитие атомной энергетики и доведение ее доли до 22-25% с целью высвобождения природного газа для экспорта. Однако с тех пор ситуация изменилась. Во-первых, производственные мощности по добыче природного газа существенно расширились при стагнации спроса, во-вторых, внутрисекторный спрос на

электроэнергию растет гораздо медленнее, и отпала необходимость в ускоренном расширении установленной мощности электростанций всех типов генерации.

Парадигма сегодняшнего развития атомной энергетики России – ввод одного блока примерно раз в год (при одновременном строительстве нескольких блоков). Это позволит гарантировать базовый заказ отечественному атомному машиностроению и обеспечить постепенное обновление АЭС, но при этом не потребует особенно больших ресурсов. Остальная активность «Росатома» будет направлена на зарубежные рынки.

В рамках «Росатома» и по его заказам работает существенная часть отечественного энергомашиностроения. Среди обрабатывающих отраслей машиностроения и, прежде всего атомное машиностроение, обладает наиболее высокой инновационно-технологической емкостью, благодаря сохранившейся и непрерывно модернизирующейся «Росатомом» макротехнологии атомной энергетики. В [9] с учетом фактической структуры затрат инвестиционный мультипликатор атомной энергетики в России был оценен в 1,36 руб. прироста производства на 1 руб. затрат или 0,92 руб. прироста ВВП на 1 руб. затрат.

Оценка макроэкономических последствий от реализации крупных инвестиционных проектов, таких как строительство АЭС, должен базироваться как минимум трех основных цепочках взаимодействий:

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

- прямые связи: эффекты, связанные с расширением производственной и инвестиционной активности непосредственно в секторе атомной энергетики;
- межотраслевые связи: расширение производства и изменение доходов в секторах связанных с атомной энергетикой;
- дополнительное распределение доходов: эффекты от распределения дополнительных доходов в пользу населения, государства, инвестиций в основной капитал.

Инструментом, позволяющим производить такие расчеты, является межотраслевой баланс производства и распределения продукции. Использование межотраслевого баланса позволяет перейти к оценкам мультипликативных эффектов как от изменения инвестиций и производства в отдельных видах экономической деятельности, так и от реализации крупных инвестиционных проектов

В [9] был проведен расчет для типового проекта строительства АЭС из 4 энергоблоков за рубежом (совокупные инвестиции – 20 млрд долл., сроки строительства – 14 лет, амортизация – 15 лет) итоговые эффекты увеличения производства в России с учетом мультипликатора в постоянных ценах составят:

- на этапе строительства – 46,2 млрд долл.;
- на этапе эксплуатации – 3,5 млрд долл.;
- интегральный эффект – 49,7 млрд долл.

Дополнительный мультипликативный эффект от строительства новых АЭС в России и за рубежом в отечественной обрабатывающей промышленности проявляется и через технологический мультипликатор – пожалуй, наиболее объективный показатель количественного оценивания эффектов инновационно-технологического развития.

Когда новые технологии, включая инновационно-производственные компоненты в оборудовании, превращаются в объекты использования в других отраслях, то это повышает эффективность отраслей-потребителей «Росатома» за счет новых технологических характеристик, ресурсосбережения и главное – сохраняет и увеличивает конкурентоспособность их производств и продукции.

Наиболее значимо воздействие технологического мультипликатора в комплексе отраслей

с наиболее высокой степенью межотраслевого взаимодействия, к которым атомная промышленность относится в первую очередь.

Воздействие технологического мультипликатора через тяжелое и энергетическое машиностроение распространяется на структурообразующие отрасли машиностроения – станкоинструментальную промышленность, приборостроение и электротехническую промышленность, формирует спрос на качественную и конкурентоспособную продукцию металлургии и химической промышленности. В этом заключается роль «Росатома» (наряду с ВПК) как важнейшего инновационного центра отечественной экономики.

Влияние технологического мультипликатора на эффективность производства существенным образом зависит от внешнеэкономического фактора. Эффективность деятельности в значительной степени зависит от объемов использования импортных компонентов производства. Чем выше зависимость от импортных компонентов, тем ниже рентабельность производимой продукции. Поэтому необходимо поддерживать и развивать те отечественные макротехнологии, которые сохранились и модернизируются, и при этом реально создают будущую конкурентоспособность, эффективность отечественного инновационного промышленного комплекса.

Выводы

Госкорпорация «Росатом» и атомная промышленность России являются важнейшим инновационным центром отечественной экономики, который обладает сильной международной конкурентоспособностью. Кроме прямого влияния на экономику, сооружение современных АЭС в России и за рубежом оказывает и сильное технологическое воздействие на отечественное машиностроение.

На внутреннем электроэнергетическом рынке России в среднесрочной, а, скорее всего, и в долгосрочной перспективе будет увеличиваться доля АЭС в выработке электроэнергии и происходить модернизация АЭС с переходом на новые современные реакторы.

На международном рынке «Росатом» имеет сильные позиции в среднесрочной перспективе,

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

но в долгосрочной – для успешной конкуренции с южнокорейскими и китайскими компаниями необходимо разрабатывать новый продукт

в расчете на рынки развивающихся стран – инновационный реактор с сильными и конкурентными технико-экономическими показателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глобальное присутствие ТК «ТВЭЛ». Информация с сайта ТК «ТВЭЛ». URL: http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite/about/global_presence/ (25.05.2017).

2. Итоги деятельности Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» за 2015 год / Публичный годовой отчет, Москва, 2015.

3. EU clears French capital injection and bridging loan for Areva, Ph.Blenkinsop and G. De Clercq URL: <http://www.reuters.com/article/us-areva-restructuring-eu-idUSKBN14U1L0?il=0> (25.05.2017).

4. Банкротство Westinghouse – трезвым взглядом, Б. Марцинкевич // ИА REGNUM. URL: <https://regnum.ru/news/economy/2256651.html> (25.05.2017).

5. Заседание Президиума НТС ГК «Росатом» в 2015 г. Выступление генерального директора ГК «Росатом» С.В. Кириенко.

6. Атомная энергетика в России и мире. Состояние и развитие. Ч. 2 // Б.И. Нигматулин. Москва, 2017.

7. World Energy Outlook 2014 // МЭА, Париж, 2014.

8. Проект Энергетической стратегии России на период до 2035 года. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1920> (25.05.2017).

9. Заседание НТС № 12 ГК «Росатом» от 26.11.2016 г. Презентация А.А.Широва «Оценка мультипликативных эффектов от реализации международных проектов по строительству АЭС (макроуровень)».

Поступила в редакцию
25.05.2017 г.

V.V. Ivanter, V.V. Semikashv³

NUCLEAR INDUSTRY ROLE IN NATIONAL ECONOMY AND CHALLENGES IT FACES

The article is the status overview with the authors' expert commentary about the nuclear industry role in the national economy. It describes current issues and challenges, and evaluates the State Atomic Energy Corporation Rosatom competitiveness on different markets. The prospects of industry development are reviewed both in terms of involvement in the national and global economy and power industry, and as regards the influence on the technological development of the domestic economy.

Key words: nuclear industry, State Atomic Energy Corporation Rosatom, NPP, Russia, NPP energy generation.

³ Viktor V. Ivanter – Director of the Institute for National Economic Forecasts of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economy, Academician, e-mail: vvivanter@ecfor.ru;

Valery V. Semikashv – Head of the Fuel and Energy Complex Forecast Laboratory at the Institute for National Economic Forecasts of the Russian Academy of Sciences, PhD in Economy, e-mail: vv_semikashv@mail.ru

УДК 621.039.544.35

**Е.П. Велихов, М.В. Ковальчук, В.И. Ильгисонис, В.В. Игнатьев, В.Ф. Цибульский,
Е.А. Андрианова¹**

ЭВОЛЮЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В НАПРАВЛЕНИИ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РЕАКТОРАМИ ДЕЛЕНИЯ И СИНТЕЗА

В работе анализируются два альтернативных варианта развития ядерной энергетической системы: с развитием быстрых реакторов, которые в перспективе должны заместить строящиеся сейчас тепловые реакторы, и гибридных термоядерных реакторов, которые способны обеспечить топливом тепловые реакторы и минимизировать риск радиационного загрязнения окружающей среды. Сравнение этих вариантов показывает, что опираясь на существующие представления о перспективах развития атомной энергетики на основе быстрых реакторов, потребуются ресурсы природного урана превосходящие современные оценки экономически целесообразных его запасов примерно в 2 раза, и топливный цикл этих реакторов будет обладать большим риском негативного воздействия на окружающую среду. Потребуется полная замена инфраструктуры атомной отрасли на производство быстрых реакторов. В случае развития ядерной энергетической системы с реакторами синтеза и деления потребности в природном уране будут соответствовать современным оценкам экономически привлекательных запасов, риск радиационного загрязнения окружающей среды будет меньше примерно в 10 раз, сохранится и современная инфраструктура атомной отрасли.

Ключевые слова: ядерная энергетическая система, замкнутый топливный цикл, гибридный термоядерный реактор синтеза, подавленное деление, жидкосолевой бланкет, быстрые ядерные реакторы, тепловые ядерные реакторы.

С первых шагов гражданского использования энергии ядра, перспективы развития атомной энергетики непременно связывают с реакторами на быстрых нейтронах и необходимостью замыкания ядерного топливного цикла. Главная причина этого заключается в ограниченности сырьевой базы. Во всех современных энергетических ядерных реакторах сжигается изотоп U-235, выделенный из природного урана. Масштаб роста атомной энергетики, основанной на существующих технологиях, будет ограничиваться ресурсом экономически доступного природного урана, по современным оценкам это около 20 млн т [1], что в энергетическом эквиваленте составляет 70-100 млрд т н.э. Можно сравнить это количество с текущим годовым потреблением энергетических ресурсов в мире – 13 млрд т н.э, и эта величина постоянно растет [2]. С такой ресурсной базой мало оснований

рассчитывать на создание крупномасштабной атомной энергетики. Рост мощностей атомной генерации на основе тепловых реакторов в 5-6 раз потребует уже больше 20 млн т природного урана. Конечно, урана в земной коре и в океане значительно больше (~10¹⁴ т), но его концентрация в этих средах очень низкая, что вызывает большие сомнения в рентабельности добычи.

Другое дело – развитие атомной энергетики на основе быстрых реакторов. Они вовлекают в топливный цикл сырьевой изотоп U-238, содержание которого в природном уране почти в 130 раз больше, чем U-235. Использование U-238 в качестве топлива означает, что сырьевая база атомной энергетики может быть обоснована практически на любой масштаб ее развития. Вовлечение U-238 реализуется благодаря тому, что в реакторах с быстрым спектром нейтронов

¹ Евгений Павлович Велихов – почетный президент Национального исследовательского центра (НИЦ) «Курчатовский институт», д.ф.-м.н., академик РАН, e-mail: velikhov@mac.com;

Михаил Валентинович Ковальчук – президент НИЦ «Курчатовский институт», д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН, e-mail: Alimova_MA@nrcki.ru;

Виктор Игоревич Ильгисонис – директор НИЦ «Курчатовский институт», д.ф.-м.н., профессор, e-mail: Ryzhova_SA@nrcki.ru;

Виктор Владимирович Игнатьев – начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт», д.т.н., e-mail: Ignatev_VV@nrcki.ru;

Виктор Филиппович Цибульский – советник президента НИЦ «Курчатовский институт», д.т.н., e-mail: Tsibulskiy_VF@nrcki.ru;

Елена Александровна Андрианова – старший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», к.т.н., e-mail: Andrianova_EA@nrcki.ru

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

при делении тяжелых ядер образуется заметно большее число вторичных нейтронов, чем при делении ядер тепловыми нейтронами. Коэффициент воспроизводства топлива в современных тепловых реакторах достигает 0,5 и может быть повышен до 0,8 в предложенных новых разработках. Для быстрых реакторов этот коэффициент теоретически может быть получен близким к 2, хотя в существующих реакторах он лишь немного превышает единицу.

Таким образом, вместо одного разделяющегося ядра делящегося изотопа в быстром реакторе образуются два новых. Эти различия в способности топливного воспроизводства послужили основанием рассматривать в качестве перспективной двухкомпонентную структуру атомной энергетики. В такой системе быстрые реакторы производят энергию, нарабатывают делящиеся изотопы из сырьевого изотопа для собственных нужд и восполнения дефицита в тепловых реакторах. Тепловые реакторы также производят энергию и в «благодарность» за снабжение их топливом берут на себя обязательства по удовлетворению системных требований: работать в переменном графике нагрузки, приспосабливаться к потребностям энергетической системы по мощностной шкале, поставлять энергию для неэлектрического применения и т.д. Предполагалось, что можно будет зафиксировать соотношение мощностей быстрых и тепловых реакторов в системе атомной энергетики (АЭ) на уровне 4 к 6, или близко к этому, что потребует от быстрых реакторов расширенного воспроизводства топлива с коэффициентом воспроизводства больше 1,5.

Для оценки системного качества быстрых реакторов, кроме коэффициента воспроизводства, важна еще одна характеристика – время удвоения, которое желательно сделать наименьшим. Время удвоения – это время, в течение которого быстрый реактор наработает столько же делящегося материала, сколько его находится в активной зоне. Характерные значения времени удвоения для проектов быстрых реакторов, разработанных в 1970-1980 гг., составляют от 5 до 10 лет.

Требования коэффициента воспроизводства больше 1,5 и малого времени удвоения в техническом плане соотносятся с необходимостью

создания реакторов с «жестким» спектром нейтронов, высокой энергонапряженностью активной зоны и минимальным временем пребывания топлива во внешней части топливного цикла, то есть временем выдержки облученного топлива до переработки не более 3 лет. В этих направлениях и проводились исследования до начала 90-х годов прошлого века.

Серьезные изменения в концепции предназначения быстрого направления проявились после Чернобыльской аварии, когда требования к безопасности ядерных реакторов ужесточились. Новое концептуальное предложение проявилось в предложении проектов быстрых реакторов с менее напряженными характеристиками, что было сделано для повышения их безопасности. Разработчики пришли к заключению, что будет достаточно, если быстрые реакторы нарабатывают топливо для себя. Предполагается, что такие быстрые реакторы заменят тепловые, и в перспективе займут монопольное положение в атомной энергетике.

Остановимся коротко на проблеме постепенной замены тепловых реакторов на быстрые с умеренными параметрами воспроизводства. Развитие быстрого направления в этих целевых ориентирах полностью меняет предыдущую концепцию двухкомпонентного развития на однокомпонентную. Возникают новые проблемы. Для комплексного рассмотрения представляется разумным провести математическое моделирование этого процесса, чтобы в цифровом виде оценить масштаб проблем при реализации заявленной концепции, содержание и сроки выполнения задуманного.

Первоочередной интерес представляет вопрос о временных параметрах реализации новой концепции развития атомной энергетики и потребности в ресурсах природного урана для сценария, когда постепенно будет происходить замена тепловых реакторов на быстрые. Актуальность ответа на этот вопрос обусловлена тем обстоятельством, что в мире сейчас строятся только тепловые реакторы, установленная мощность которых на конец 2016 г. составляла 391 ГВт(эл). Быстрый реактор БН-800, построенный в России, даже сами разработчики не рассматривают как прототип будущих серийных быстрых реакторов, которые заменят тепловые.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Быстрый реактор БН-600 приближается к исчерпанию эксплуатационного ресурса и в ближайшие годы будет выведен из эксплуатации.

Для моделирования перспективы ниже рассматриваются реакторы БРЕСТ и БН-1200 как прототипы будущего быстрого реактора [4]. Две современные разработки, которые, по заявлениям авторов, будут реализовывать стратегическую перспективу. Энергетический сценарий наращивания мощностей АЭ в мире соответствует низкому сценарию МАГАТЭ [5], когда атомная энергетика обеспечивает приблизительно 20% спроса на электроэнергию.

Считается, что к концу века общее потребление электроэнергии увеличится примерно до 80 ПВт·ч, в настоящее время потребление электроэнергии составляет около 25 ПВт·ч. Такой темп роста электропотребления соответствует приращению 1,5% в год. Для справки: в предыдущие 20 лет рост электропотребления в мире составлял 3% в год, то есть рассматривается сценарий со скромными темпами роста электрогенерации, а АЭ сохраняет постоянную долю в глобальном производстве электроэнергии.

Сценарии МАГАТЭ были ограничены длительностью рассмотрения до конца текущего века. Для целей данной работы нам потребовалось увеличить расчетный интервал прогнозирования еще на сто лет, чтобы процедура замены тепловых реакторов на быстрые состоялась и можно было сделать выводы относительно новой концепции. Считалось, что на период до середины века массовой замены тепловых реакто-

ров на быстрые происходить не будет, в странах мира серийно будут строиться только тепловые реакторы типа ВВЭР. Характеристики тепловых реакторов и приходящих им на замену быстрых реакторов представлены в табл. 1.

Конечно, отдельные экземпляры перспективных быстрых реакторов будут строиться и до середины века, но масштабного их строительства, очевидно, не будет. Быстрые ядерные реакторы – сложные объекты, и разумно, чтобы до их масштабного (серийного) развертывания практикой были подтверждены их характеристики, в первую очередь по безопасности, и, конечно, по эксплуатационной надежности, а достоверная оценка таких параметров требует значительного времени.

На рис. 1 представлены результаты моделирования обсуждаемой стратегии – замены тепловых реакторов на быстрые. В качестве быстрых реакторов в этом конкретном расчете представлен реактор БРЕСТ-1200. В данном расчете длительность пребывания топлива во внешней части топливного цикла составляла 1 год.

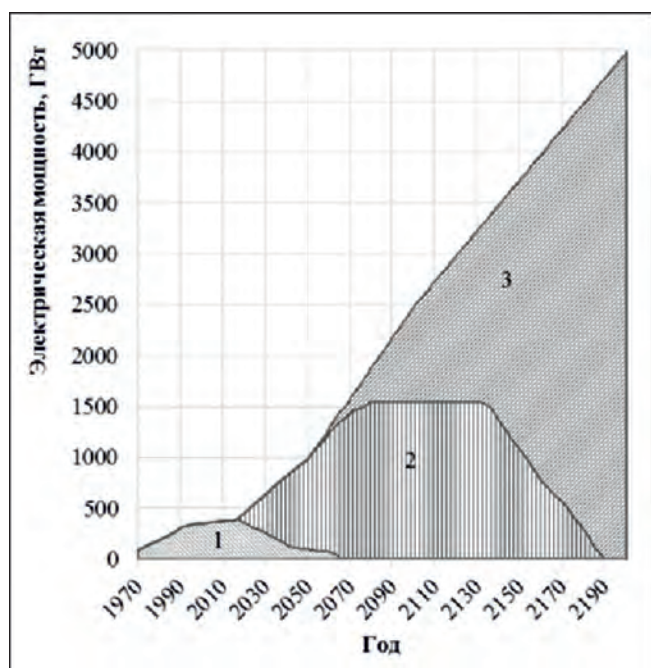
Считалось, что тепловые реакторы замещаются на быстрые после их останова для вывода из эксплуатации, второе условие – наличие плутония на складе для формирования стартовой загрузки быстрого реактора. Согласно расчетам, реализация программы замены тепловых реакторов на быстрые потребует расхода природного урана в количестве 35 млн т. Расчеты, проведенные для другого быстрого реактора

Таблица 1

Характеристики тепловых и быстрых реакторов

Показатели	ВВЭР-1000 [6]	ВВЭР-ТОИ	БН-1200	БРЕСТ-1200
Электрическая/тепловая мощность, ГВт	1000/3200	1255/3312	1220/2800	1220/2800
Начальная загрузка, т тм	70/3,11	77/3,9		
АЗ, МОХ/U/Pu			41,6/34,2/7,4	63,9/55,3/8,6
НТЭ, UOX/x5			20,2/0,3	
БЗВ, UOX/x5			44,4/0,3	
Ежегодная загрузка, т тм	22,8/4,4	23,4/4,74		
АЗ, МОХ/U/Pu			7,6/6,2/1,4	12,8/11,1/1,7
НТЭ, UOX/x5			3,7/0,3	
БЗВ, UOX/x5			5,0/0,3	

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ



1 – ВВЭР-1000 (обогащенный уран), 2 – ВВЭР-ТОИ (обогащенный уран), 3 – БРЕСТ (наработанный в системе плутоний)

Рис. 1. Установленные мощности реакторов разных типов в программе замены тепловых реакторов на быстрые

БН-1200, показали практически такой же результат.

Как следует из полученных результатов замены тепловых реакторов на быстрые, естественно, допустима, но процесс этот будет длителен, около 200 лет. Он потребует использования ресурсов природного урана приблизительно в два раза превышающих современные оценки его экономически приемлемых запасов. Переработка облученного топлива будет сопровождаться большим количеством высвобождаемой радиоактивности, что заметно повысит риск радиационного загрязнения окружающей среды.

Если рассматривать сценарии с более интенсивным развитием АЭ, например, средний вариант МАГАТЭ, который характеризуется установленной мощностью 5000 ГВт к концу века, то замена тепловых реакторов на быстрые отодвинется еще на столетие, а потребность в природном уране приблизится к 100 млн т.

В целом, похоже, что подобные сценарии глобального развития атомной энергетики в большей мере выполняют функцию оправдательных аргументов для продолжения разработки быстрых реакторов с относительно умеренными

параметрами воспроизводства и большой начальной загрузкой топлива. Большие сроки реализации концепции выхолащивают ее практическую значимость. С учетом реальной практики, когда в мире строятся только тепловые реакторы и инфраструктура, ориентированная на них, приобретает все большие масштабы, с учетом факторов неопределенности и возможных альтернатив варианты будущего доминирования быстрых реакторов выглядят маловероятными.

Для практического развития конкретной энерготехнологии, имея ввиду большую инерционность и затратность этой сферы, желательно присутствие в экономике условного или реального спонсора, который уже работает в сфере энергетики, имеет достаточно большой вес и будет связывать перспективы своего устойчивого развития с освоением новых технологий. Новые технологии как минимум не должны угрожать перспективе спонсора. В таком случае новое не вступает в конкуренцию с уже существующим, а наоборот – подкрепляет его, расширяет эволюционный потенциал развития уже существующих и укрепившихся на рынке технологий.

С таких позиций можно отметить, что в сложившейся ситуации атомная энергетика на тепловых реакторах является естественным союзником любых способов расширения своей ресурсной базы, поскольку направление быстрых реакторов предполагает полный вывод из эксплуатации тепловых реакторов и, конечно, замену всей инфраструктуры и ряда надежных реакторных технологий.

Из всех вариантов расширения ресурсной базы атомной энергетики, а это непременно связано с замыканием топливного цикла и вовлечением в него сырьевых изотопов урана-238 и тория-232, наиболее привлекательным выглядит вариант использования термоядерных нейтронов для конверсии их в делящиеся плутоний-239 или уран-233. Эта предложение было высказано впервые еще в 1956 г. И.В. Курчатовым [7], обратившим внимание на важное обстоятельство. При одной и той же тепловой мощности с помощью термоядерного реактора можно будет набирать как минимум на порядок больше нового делящегося изотопа в сравнении с вариантом, когда для этой цели используется реактор деления. Это обстоятельство означает,

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

что в системе реакторы деления плюс реакторы синтеза доля последних, ориентированных на снабжение реакторов деления топливом, будет существенно меньше доли быстрых реакторов, если бы они взялись обеспечивать тепловые реакторы топливом, даже в том случае если бы быстрые реакторы имели высокий коэффициент воспроизводства, порядка 1,5-1,6. В ситуации же, когда быстрые реакторы вообще не планируют снабжать топливом тепловые, создание гибридного термоядерного реактора для производства топлива для тепловых реакторов деления становится весьма благоприятной альтернативой или дополнением к быстрому направлению.

Использование термоядерных нейтронов для конверсии сырьевых изотопов в делящиеся может быть реализовано в бланкете гибридных термоядерных реакторов, где в результате радиационного захвата нейтронов сырьевыми изотопами происходит их превращение в делящиеся. В этом варианте термоядерный реактор представляет собой, по существу, источник нейтронов высокой интенсивности. Использование такой схемы требует эффективной очистки бланкета от накопившихся делящихся изотопов, чтобы максимально ограничить в нем энерговыделение. Для этой цели предполагается размещение в бланкете термоядерного реактора жидкосолевой топливной композиции, чтобы в непрерывном режиме экстрагировать из него накопившиеся делящиеся изотопы и небольшое количество образовавшихся продуктов деления.

Расчеты показывают, что если в жидкосолевой бланкет гибридного реактора в качестве сырьевого изотопа поместить уран-238, то при образовании одного нового ядра делящегося изотопа плутония-239 будет выделено более 43 МэВ энергии, преимущественно за счет деления ядер урана-238, присутствующих в расплаве соли. В том случае, когда в солевой композиции будет размещен торий-232, энергия, выделяемая при производстве одного нового ядра урана-233, будет примерно в 2 раза меньше – около 25 МэВ. Сечение деления тория в области высоких энергий нейтронов более чем в 2 раза меньше аналогичного сечения деления урана-238. Соответственно и радиоактивность солевой композиции и количество продуктов деления тяжелых ядер, от которых ее надо будет чистить, также пример-

но в 2 раза меньше по сравнению с уран-плутониевым топливным циклом [8]. Важно и то, что использование урана-233 в тепловых реакторах наиболее привлекательно. Именно в тепловом спектре размножающая способность урана-233 выше по отношению к урану-235 примерно на 0,2 нейтрона. Примечательно, что именно ториевый топливный цикл наиболее привлекателен для тепловых реакторов, которые в настоящее время и, скорее всего, в обозримой перспективе будут основными генераторами энергии. В системе гибридный термоядерный реактор – реактор деления реализуется следующий обмен изотопами: в реакторе деления избыточные при реакции деления нейтроны используются для получения трития из лития, а термоядерные нейтроны, полученные в дейтерий-третиевой реакции гибридного термоядерного реактора, используются для получения делящегося изотопа из урана-233. На рис. 2 приставлена схема обмена изотопами в ЯЭС.

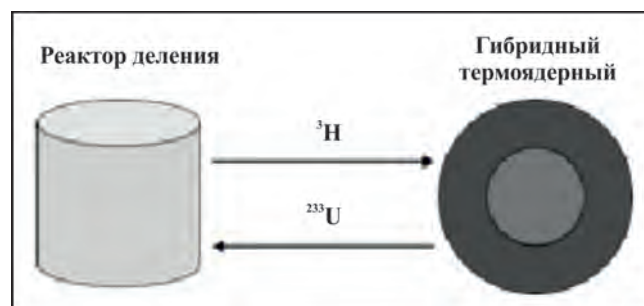


Рис. 2. Обмен изотопами в ЯЭС с реакторами деления и синтеза

Такой топливный цикл системы целесообразен по простой причине. Из нейтрона в тепловом реакторе можно в лучшем случае получить одно новое ядро делящегося изотопа. Но если нейтрон будет термоядерным с энергией около 14 МэВ, то за счет размножения в ядерных реакциях ($n, 2n$), ($n, 3n$), (n, f) нейтронов можно будет получить больше в полтора и более раз. То есть в такой системе наработка делящихся изотопов существенно превосходит их наработку в самых передовых быстрых реакторах.

Баланс объединенного топливного цикла (рис. 2) наглядно демонстрирует достаточность нейтронов в тепловом реакторе для производства трития, с помощью которого в гибридном реакторе будет производиться урана-233 в боль-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Таблица 2

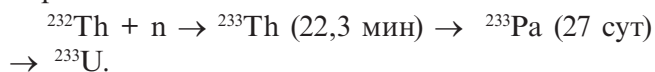
Баланс топливного цикла ГТР и реактора деления на тепловых нейтронах

Характеристики	Реактор деления	ГТР
Мощность, МВт (тепл.)	3200	470
Потребление ^{233}U , кг/год	1251	—
Производство ^{233}U , кг/год	—	1251
Производство ^3H , кг/год	<19	—
Потребление ^3H для производства ^{233}U , кг/год	—	16
Генерация нейтронов, кг/год	11,7	5,3
Расход нейтронов для производства ^3H , кг/год	<6,3	—
Расход нейтронов для деления ядер, кг/год	5,4	—
Избыток и/или допустимые потери нейтронов в системе, кг/год	<0,9 (8%)	—

шем количестве, чем его было сожжено в тепловом реакторе.

Представленные в табл. 2 данные соответствуют варианту, когда в гибридном термоядерном реакторе нарабатывается такое же количество U-233, как было сожжено в тепловом реакторе. Это означает, что в переработке ОЯТ теплового реактора нет надобности. Соотношение мощностей гибридного реактора и теплового реактора деления составляет 470 МВт / 3200 МВт, то есть тепловая мощность гибридного реактора будет составлять примерно 15% от мощности теплового реактора. При этом получается еще небольшой запас нейтронов, порядка 8%, который можно рассматривать как компенсацию различных факторов неопределенности.

В гибридном термоядерном реакторе наработка делящихся изотопов происходит в бланкете. В варианте, когда в бланкете находится расплавно-солевая композиция с сырьевым изотопом и реализована непрерывная быстрая ее очистка от небольшого количества продуктов деления и вновь наработанного делящегося изотопа, есть основания рассчитывать на минимальное высвобождение радиоактивности в процессе наработки урана-233. При получении делящегося изотопа из тория последовательность ядерных реакций выглядит следующим образом:



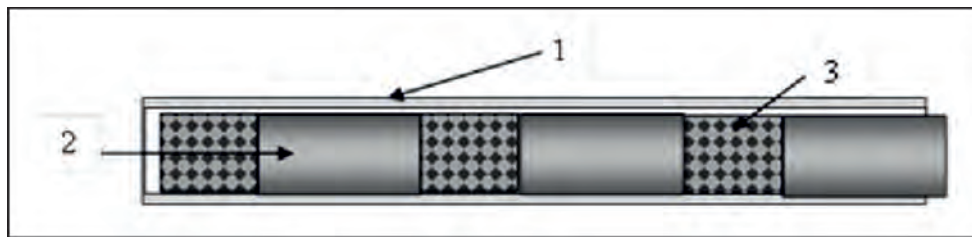
Новый делящийся изотоп получается после распада ^{233}Pa (приблизительно в течение месяца), что дополнительно снижает вероятность деления урана-233 в бланкете при его быстрой очистке от протактиния.

Расчеты показывают, что при наработке U-233 в бланкете гибридного термоядерного реактора высвобождаемая радиоактивность в расчете на 1 г наработанного делящегося изотопа будет наименьшая (почти на два порядка меньше в сравнении с переработкой ОЯТ из реакторов деления).

Представленная схема снабжения тепловых реакторов топливом в общем случае является более гибкой. Если по каким-то причинам будет признано, что часть U-233, который накапливается в ОЯТ теплового реактора, целесообразно вернуть в топливный цикл, то это эффективно может быть сделано без существенного высвобождения радиоактивности при переработке ОЯТ. В этом случае, когда из ОЯТ теплового реактора будут извлекать наработанный в нем уран-233, разумно в твэлах теплового реактора разместить делящийся и сырьевой изотопы в разных таблетках, в гетерогенной форме (рис. 3).

В процессе выгорания в основном будут «гореть» те таблетки, в которых исходно размещен делящийся изотоп, а, следовательно, и продукты деления будут сосредоточены именно в этих таблетках. В то же время в таблетках с сырьевым изотопом будет накапливаться U-233. После об-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ



1 – оболочка ТВЭЛ, 2 – таблетки с сырьевым изотопом, 3 – таблетки с делящимся изотопом (доля делящегося материала <10% объема)

Рис. 3. Гетерогенное размещение делящегося и сырьевого изотопа в ТВЭЛ теплового реактора

лучения, чтобы не повышать риск радиационной опасности таблетки, исходно содержащие делящийся изотоп, можно не перерабатывать, а отправить на длительное хранение. При этом многослойные защитные оболочки топлива в этих таблетках будут надежным барьером на пути распространения радиоактивности во время хранения. U-233, выделенный из таблеток с сырьевым изотопом, по количеству может составлять до половины от сожженного в реакторе. В такой системе доля гибридных термоядерных реакторов в системе будет составлять всего 7%.

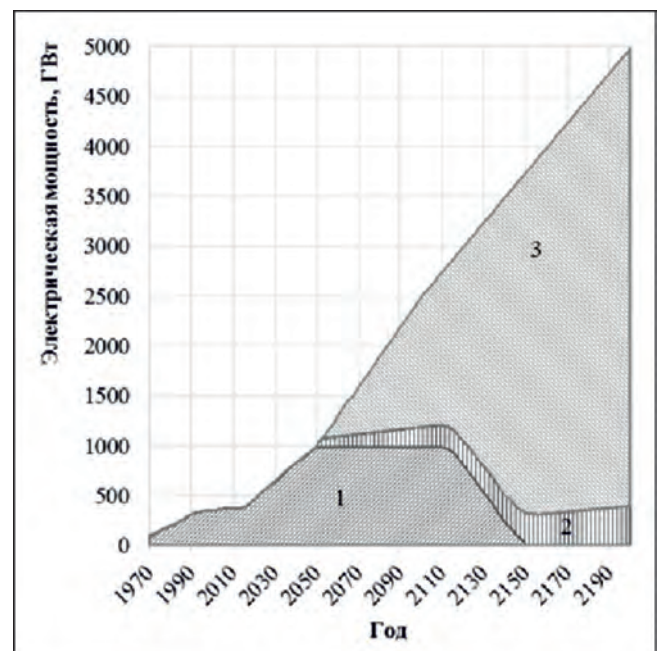
Рассмотрим топливный баланс с системных позиций с целью сравнить его с вариантом развития атомной энергетики по сценарию, который в рамках проектного направления «Прорыв» [3] рассматривается как основной, то есть вариант с быстрыми реакторами без расширенного воспроизводства, которые в перспективе заместят тепловые реакторы (рис. 1).

Для ядерной энергетической системы (ЯЭС) на основе реакторов синтеза и деления проведен расчет для сценария роста мощностей системы, как и в варианте с быстрыми реакторами (рис. 1). Расчеты выполнены в предположении, что в мире продолжают строиться только тепловые реакторы, а гибридные термоядерные реакторы, которые нарабатывают уран-233 для тепловых реакторов деления, начнут вводиться в эксплуатацию с середины нынешнего века. Результаты этого расчета представлены на рис. 4. Из них видно, что система вполне справляется с проблемой топливообеспечения даже в том случае, когда в ней присутствуют только тепловые реакторы деления. Для реализации этой программы потребуется менее 20 млн т природного урана.

Доля гибридных термоядерных реакторов в системе в данном случае составляет около 8%,

из ОЯТ тепловых реакторов перерабатывается только топливные таблетки, исходно содержащие ThO_2 . В этом сценарии риск радиационного воздействия на окружающую среду более чем в 10 раз меньше в сравнении с вариантом с быстрыми реакторами. Вместе с тем такая концепция не исключает из системы быстрые реакторы, которые могут оказаться более адаптивными к внешней системе, чем тепловые.

Разработка гибридного термоядерного реактора (ГТР), ориентированного на производство топлива для АЭ, может быть выполнена в довольно сжатые сроки. На начальном этапе можно не требовать от гибридного реактора



1 – тепловые реакторы на обогащенном уране, 2 – гибридный термоядерный реактор, 3 – тепловые реакторы с топливом U-233.

Рис. 4. Установленные мощности реакторов разных типов в ЯЭС с реакторами деления и синтеза

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

высокой энергетической эффективности, достаточно будет если ГТР вернет в систему столько же энергии, сколько было использовано для поддержания термоядерной реакции. Еще один важный аспект связан с тем, что требования непрерывности работы к гибриднему реактору могут быть существенно смягчены, поскольку ГТР производит уран-233, и его можно накапливать на складах. Такое положение реализуется существенно легче в сравнении с вариантом производства электроэнергии, где требуется высокий коэффициент использования мощности.

Два этих облегчающих обстоятельства настолько значимы, что, по оценкам экспертов, современные достижения в области реализации программы освоения управляемого термоядерного синтеза уже можно признать достаточными, чтобы приступить к практическим проработкам пилотных проектов гибридных термоядерных реакторов.

Важно соблюсти временной фактор и зафиксировать технологическое преимущество в разработке новых технологий не только на уровне идей, но и на практике. Это гарантировано обеспечит и коммерческий приоритет на мировом рынке очень большой емкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Uranium 2014: resources, production and demand*. NEA OECD, 2014.
2. *Годовой отчет ВР [Электронный ресурс]*. URL: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (дата обращения 18.01.2017).
3. Толстоухов Д.А. Обеспечение конкурентоспособности атомной энергетики. Проектное направление «ПРОРЫВ»: Место и преимущества проекта в развитии мировой энергосистемы», 7-8 июня 2016 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.innov-rosatom.ru/files/articles/ae13c91a88ffe014e4cd1e8c9ba4a826.pdf> (дата обращения 18.01.2017).
4. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / под ред. Пономарева-Степного Н.Н., М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016.
5. *Nuclear energy development in the 21st century: global scenarios and regional trends*. IAEA, No. NP-T-1.8, Vienna, 2010.
6. *Ядерная энергетика. Проблемы и перспективы. Экспертные оценки*. М., 1989.
7. Курчатов И.В. О возможности создания магнитных термоядерных реакторов. Собр. науч. трудов. М.: Наука, 2012. Т. 5. С. 78-81.
8. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Азизов Э.А., Игнатьев В.В., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. Термоядерный источник нейтронов для производства ядерного топлива // *Атомная энергия*, 2013. Т. 114, вып. 3. С. 160-165.

Поступила в редакцию
29.05.2017 г.

**E.P. Velikhov, M.V. Kovalchuk, V.I. Ilgisonis, V.V. Ignatyev,
V.F. Tsibulskiy, E.A. Andrianova²**

TRANSFORMATIONAL GROWTH OF NUCLEAR POWER INDUSTRY TOWARDS LARGE-SCALE NUCLEAR ENERGY SYSTEM WITH FUSION-FISSION REACTORS

The paper reviews two alternative options of nuclear energy system development: with advanced fast reactors that in future should replace thermal reactors currently under construction, and fusion-fission reactors capable of providing thermal reactors with fuel and minimize the risk of environmental radioactive pollution. The comparison of these options indicates that with the existing conceptions of nuclear energy development prospects based on fast reactors it will require natural uranium resources approximately twice as much as the modern estimates of its economically feasible reserves, and the fuel cycle of these reactors will pose higher environmental risk. The nuclear industry infrastructure will have to be changed completely to produce fast reactors. In case of nuclear energy system development with fusion-fission reactors, natural uranium demands will correspond to the modern estimates of economically attractive reserves, the risk of radioactive pollution will be reduced by approximately 10 times, and the current nuclear industry infrastructure will be preserved.

Key words: nuclear energy system, closed fuel cycle, fusion-fission reactor, suppressed fission, molten-salt blanket, fast reactors, thermal reactors.

¹ Evgeny P. Velikhov – Honorary President of the National Research Center (NRC) «Kurchatov Institute», Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the RAS, *e-mail:* velikhov@mac.com;
Mikhail V. Kovalchuk – President of the NRC «Kurchatov Institute», Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Corresponding Member of the RAS, *e-mail:* Alimova_MA@nrcki.ru;
Viktor I. Ilgisonis – Director of the NRC «Kurchatov Institute», Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, *e-mail:* Ryzhova_SA@nrcki.ru;
Viktor V. Ignatyev – Head of Laboratory at the NRC «Kurchatov Institute», Doctor of Engineering, *e-mail:* Ignatev_VV@nrcki.ru;
Viktor F. Tsibulskiy – Advisor to President at the NRC «Kurchatov Institute», Doctor of Engineering, *e-mail:* Tsibulskiy_VF@nrcki.ru;
Elena A. Andrianova – Senior Researcher at the NRC «Kurchatov Institute», PhD in Engineering, *e-mail:* Andrianova_EA@nrcki.ru

УДК 621.039 (470+571)

Е.О. Адамов, Д.С. Соловьёв¹

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА – ВЫЗОВЫ И РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ

В статье анализируются проблемы развития современной ядерной энергетики (ЯЭ) и пути их решения на основе замкнутого ядерного топливного цикла (ЯТЦ) с быстрыми реакторами (БР). Определены технические требования к ядерным энергосистемам для создания крупномасштабной ЯЭ. Рассмотрены цели и решаемые научно-технические задачи проекта «Прорыв» Государственной корпорации «Росатом», реализуемого в рамках Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 гг. и на перспективу до 2020 года». Представлена оценка требуемых технико-экономических показателей АЭС с БР, при которых возможно достигнуть конкурентных преимуществ над электростанциями с органическим топливом.

Ключевые слова: ядерная энергетика, быстрые реакторы, замкнутый топливный цикл, крупномасштабная ядерная энергетика, облученное ядерное топливо, безопасность, нераспространение, проект «Прорыв».

В 2000 г. Правительство РФ одобрило Стратегию развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Столь далекий по глубине планирования стратегический документ оказался первым среди ведущих стран мира, и только позднее ко многим пришло осознание, что для такой весьма инерционной технологической сферы, как энергетика, нужны именно такие горизонты расстановки ключевых вех. На самом деле, для рождения новых проектов нужны десятилетия, их реализация занимает в лучшем случае также 10 лет, а работают объекты ядерной энергетики сегодня не менее 60 лет, с вполне вероятной перспективой продления ресурса. Безусловно, обновление стратегических планов также должно происходить регулярно с тем, чтобы учитывать как технологическое развитие, так и меняющуюся картину окружающего мира. К сожалению, Стратегия 2000 г. пока так и остается неактуализированной с момента своего появления. Тем более интересно посмотреть, в какой мере она оказалась основательной и не повторила ли судьбу своих, пусть и не столь на долгую перспективу, аналогов, давно потерявших актуальность.

Начнем с сырьевых прогнозов, значительную часть которых, связанных с запасами органических ресурсов, жизнь опровергла. Появились и новые традиционные для разработчиков за-

лежи органики, например, в Астраханской области или на Каспийском шельфе, а также, если не ограничиваться российской территорией, то, прежде всего сланцевые месторождения, известные как конкреции мирового океана достаточно давно, однако не имевшие приемлемых по экономике технологий для освоения. Сегодня добыча нефти и газа из сланцев превратила США из импортера органики в страну, претендующую на экспорт, прежде всего сжиженного газа.

Ничего похожего не произошло в мировой ядерной энергетике. Пережившая чернобыльскую трагедию, отрасль к 2010 г. вышла на новые стартовые позиции и спотовые цены основного сырья – U_3O_8 взлетели до почти 140 долл./фунт, а после фукусимской аварии в 2011 г. вновь ушли ниже 30 долл./фунт желтого кека. Запасов относительно дешевого уранового сырья (около 6 млн т в 2016 г.) при условии, что АЭС по-прежнему будут использовать только изотоп ^{235}U и суммарная мощность останется на нынешнем уровне, хватит лишь до конца столетия. Однако основой для развития, как и предусмотрено в Стратегии, остается ^{238}U , запасы которого в 150 раз больше, а при их исчерпании можно перейти к использованию торий-уранового цикла. Если запасы органики, даже пополняясь, сохраняют прогнозы исчерпания

¹ Евгений Олегович Адамов – научный руководитель проектного направления «Прорыв» – Инновационно-технологического центра ГК «Росатом», научный руководитель АО «НИКИЭТ», д.т.н., профессор, e-mail: aeo@progv2020.ru;
Дмитрий Сергеевич Соловьёв – ученый секретарь технического комитета Инновационно-технологического центра проекта «Прорыв» ГК «Росатом», e-mail: sds@progv2020.ru

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

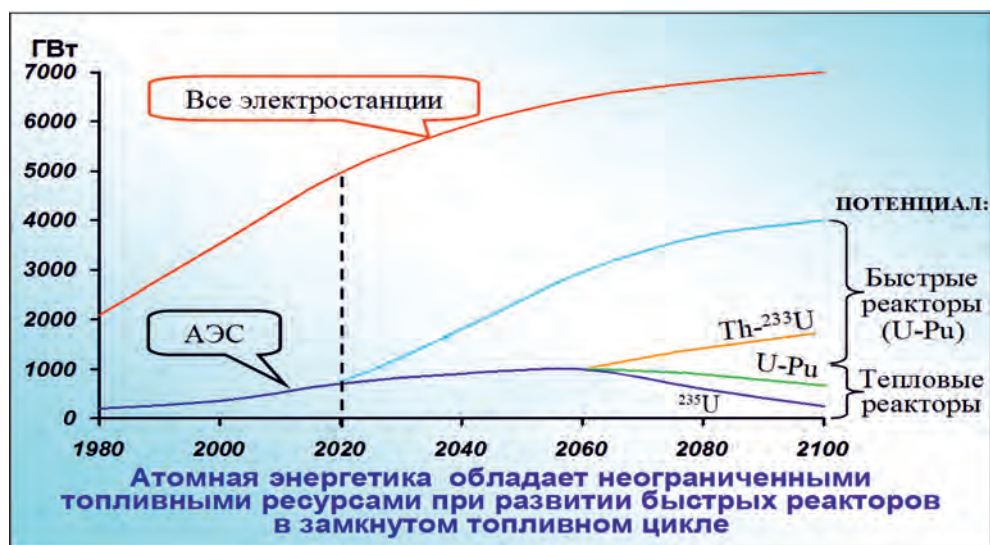


Рис. 1. Топливный потенциал развития ЯЭ на быстрых реакторах

в пределах нескольких сотен лет, то сырья для ядерной энергетики достаточно на несколько тысячелетий при ее крупномасштабном использовании, например, так как это и было предусмотрено Стратегией 2000 г. (рис. 1), которая показала возможность полного покрытия всех потребностей в приросте производства электроэнергии в мире за счет ЯЭ, однако уже на новой технологической платформе.

Прогнозировавшийся рост мощностей ЯЭ не слишком отклонился от реальности: суммарная мощность АЭС в РФ составляет почти 28 ГВт (по прогнозу Стратегии 30 ГВт). Проекты энергоблоков третьего поколения доведены до коммерческой реализации (1-й блок второй очереди Нововоронежской АЭС уже работает, а первый блок второй очереди Ленинградской АЭС готовится к запуску в этом году). Выше всяких прогнозов оказался экспорт российских АЭС, топлива и профильных услуг: в портфеле ГК «Росатом» сегодня на 10 лет заказов более чем на 130 млрд долларов. Напомним, что у «Росвооружения», второго главного источника несырьевого экспорта, портфель заказов составляет менее 50 млрд долларов. Построен и блок с реактором на быстрых нейтронах БН-800.

Приоритетным условием развития ЯЭ России Стратегия называла поддержание безопасного и эффективного функционирования действующих АЭС. Для мировой ЯЭ, списавшей чернуюбыльскую аварию то ли на канальный тип реактора, то ли на недостаточный уровень

«культуры безопасности» в СССР, это также было главным условием развития, и она с этим не справилась. Причем фронт был прорван, казалось бы, в самом надежном, с точки зрения той же культуры безопасности, месте – в Японии. Канальных реакторов у Японии, в отличие от России, Англии или Канады, не было вовсе и аварии произошли на трех корпусных реакторах американской конструкции и нескольких хранилищах отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Масштаб катастрофы технически превышает чернуюбыльскую, где разрушенным оказался только один реактор. Однако глобальным последствием Фукусимы стал отказ от ЯЭ таких стран, как Германия, Швейцария, Бельгия, Нидерланды. Отказалась от своих планов Италия, готовившаяся начать развитие ЯЭ на собственной территории, после того как уже многие годы подпитывается электроэнергией, производимой на французских АЭС.

И вот здесь следует назвать главное отличие Стратегии 2000 от реальности. До 2010 г. планировалось завершить сооружение демонстрационного блока АЭС с естественной безопасностью (реактор на быстрых нейтронах и опытные производства его топливного цикла). Именно на таком реакторе детерминистически исключаются как аварии типа чернойбыльской (разгон реактора на мгновенных нейтронах), так и с потерей охлаждения активной зоны, ее плавлением. Это произошло сначала на первом же энергетическом реакторе в США в 1954 г.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

(первый реактор на быстрых нейтронах EBR-1), затем там же в 1979 г. (реактор PWR АЭС в Три-майле) и, наконец, на трех реакторах в Японии (BWR АЭС «Фукусима»).

В 2010 г. благодаря представленной С.В. Кириенко и утвержденной Правительством РФ Федеральной целевой программе по новой технологической платформе были возобновлены работы, бездумно прерванные на целое десятилетие в 2001 году. Часть проектов ФЦП в 2013 г. была объединена в проектом направлении «Прорыв», ориентированном на создание в едином демонстрационном комплексе энергоблока с реактором на быстрых нейтронах, производство принципиально нового плотного топлива и комплекса по его переработке и удалению РАО. Каждый из этих объектов обладает своими особенностями и должен быть рассмотрен отдельно с тем, чтобы дать полное представление о новой технологической платформе, развитие которой неизбежно приведет к двухкомпонентности ЯЭ в текущем столетии.

Опытно-демонстрационный энергокомплекс (ОДЭК) впервые в мире должен продемонстрировать устойчивую работу полного комплекса объектов (ЭБ на базе РУ БРЕСТ-300, модуль фабрикаций/рефабрикаций топлива, модуль переработки топлива), обеспечивающих замыкание топливного цикла. Пристанционный вариант организации топливного цикла (ПЯТЦ) позволяет отработать технологии «короткого топливного цикла» в минимальные сроки в пределах одной площадки. В табл. 1 приведены основные параметры ОДЭК.

Следует отметить, что все разрабатываемые технологии (за исключением логистики) и оборудование могут быть использованы и при цен-

трализованной организации топливного цикла (ЦЯТЦ) в том случае, если это обеспечивает оптимальную технико-экономическую эффективность при приемлемой логистике. Наиболее логичной представляется модульная организация соответствующих производств, позволяющая расширять и увеличивать производительность производств в соответствии с планами ввода энергетических объектов.

Пристанционный топливный цикл включает в себя два основных модуля – МФР и МП, имеющих общую систему обращения с радиоактивными отходами (РАО). На первом из них впервые в мире создается опытно-промышленное производство смешанного нитридного топлива на основе энергетического плутония и обедненного урана с использованием технологии карбо-термического синтеза.

Единый модуль фабрикаций и рефабрикаций топлива позволяет работать как с исходными материалами, так и с продуктами переработки ОЯТ реактора БРЕСТ-ОД-300, а также предусматривает включение в топливо минорных актинидов для последующей их трансмутации.

Ключевым элементом ОДЭК является первый в мире инновационный демонстрационный опытно-промышленный энергоблок на базе быстрого реактора БРЕСТ-ОД-300 (рис. 2) со свинцовым теплоносителем, в полной мере реализующий принципы «естественной безопасности» (основные характеристики – в табл. 2).

Основными особенностями РУ БРЕСТ-ОД-300 являются:

- отсутствие запаса реактивности, достаточного для реализации тяжелой реактивной аварии;

Таблица 1

Основные характеристики ОДЭК

Установленная электрическая мощность, брутто	300 МВт
Вид топлива	Смешанное нитридное уран-плутониевое (СНУП)
Проектный срок службы (в режиме НИОКР)	30 лет*
Проектный срок службы технологического оборудования топливного цикла, не менее	30 лет
Производительность производства фабрикаций и рефабрикаций топлива	14 т/год
Производительность производства переработки отработавшего ядерного топлива	5 т/год

Примечание: * – перевод в энергетический режим использования может быть рассмотрен дополнительно.

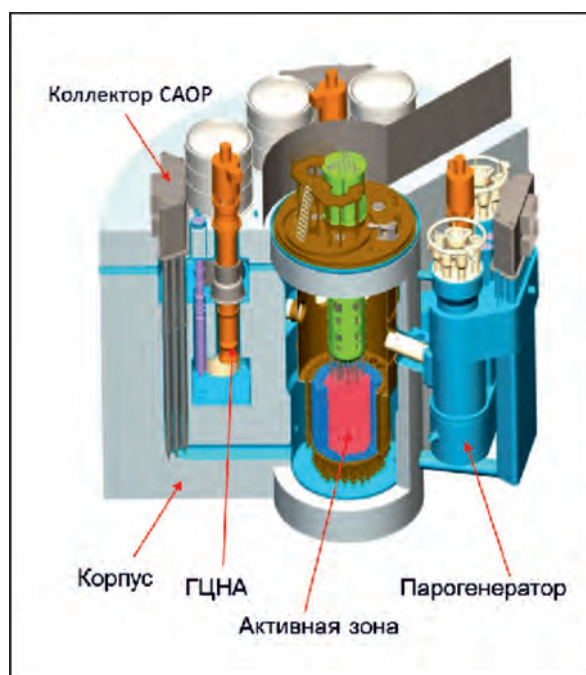


Рис. 2. РУ БРЕСТ-ОД-300

Таблица 2

Основные характеристики РУ БРЕСТ-ОД-300

Тепловая мощность, МВт	700
Число ТВС в активной зоне	169
Топливо	СНУП
Загрузка топлива, т	20,6
Коэффициент воспроизводства активной зоны (КВА)	1,05
Количество петель	4
Теплоноситель первого контура	свинец
Максимальное давление теплоносителя в первом контуре, МПа	1,17
Температура теплоносителя на входе/выходе из активной зоны, °С	420 /535
Средняя температура рабочего тела на входе/выходе из ПГ, °С	340 / 505
Давление на выходе из парогенератора, МПа	17
Паропроизводительность, т/ч	1500

- интегральная компоновка первого контура (нет выхода теплоносителя за пределы корпуса) для исключения потери теплоносителя;
- применение малоактивируемого теплоносителя с высокой температурой кипения, не вступающего в бурное взаимодействие с водой и воздухом в случае разгерметизации контура;

- осуществление полного воспроизводства топлива непосредственно в активной зоне, сжигание долгоживущих актинидов;
- упрощение систем безопасности благодаря физическим свойствам применяемых материалов и конструктивным решениям.

Для реакторов на быстрых нейтронах оптимальным является плотное топливо, среди фундаментальных свойств которого три играют

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Таблица 3

Сравнение основных параметров различных видов топлива

Характеристика	$UPuO_2$ $U_{0,8}Pu_{0,2}O_2$	$UPuN$ $U_{0,8}Pu_{0,2}N$	$U-Pu-Zr$ $U-19Pu-10Zr$
Теоретическая плотность, г/см ³	11,04	14,32	15,73
Рекомендованная эффективная плотность топлива, % т.п. (г/см ³)	~85 (9,3)	80 (11,5)	~75 (11,8)
Теплопроводность, Вт/м·К, 1000 К	2,6	15,8	25
Температура плавления, К	3023	3070	1400
Предельная допустимая температура топлива, °С	Более 2000	Не более 1800*	Не более 800

Примечание: * – недостаточно данных, требуются дополнительные исследования.

существенную роль с точки зрения влияния на базовые характеристики активных зон и безопасность: плотность, теплопроводность и удельное количество рассеивающих нейтроны легких элементов (кислород, углерод и азот). Более высокая плотность топлива и меньшее количество легких элементов способствует росту коэффициента воспроизводства в активной зоне реактора (КВА) и интегрального КВ по РУ. Особые уникальные свойства обретают активные зоны с так называемым «равновесным топливом», в котором выгорание делящегося вещества полностью компенсируется его воспроизводством. Сравнение характеристик различных видов плотного топлива приведено в табл. 3.

Несмотря на то что металл имеет максимальную теоретическую плотность, нитридное топливо (UN и UPuN) практически не уступает по плотности легированному металлическому топливу, в котором Zr и увеличенная пористость,

необходимая для снижения распухания и увеличения ползучести, снижают его плотность.

Для того чтобы оценить и понять влияние параметров топлива на характеристики активных зон, рассмотрены возможные компоновки реактора типа БН-1200 на МОКС-топливе, СНУП-топливе, металлическом смешанном топливе с натриевым подслоем и проведены соответствующие нейтронно-физические расчеты, см. табл. 4.

Существенно более низкая допустимая температура оболочки твэла с металлическим топливом (не более 620 °С) не позволяет достигнуть параметров паросилового цикла, принятого для реактора БН-1200 и соответствующих величин его КПД.

Исходя из проведенного анализа был сделан вывод о предпочтительности выбора нитридного топлива, которое позволяет достичь принципиально новых качеств активной зоны с КВА~1,

Таблица 4

Сравнение основных параметров БН-1200 с различными видами топлива

Параметр	$UPuO_2$	$UPuN$	$U-Pu-Zr$
Коэффициент воспроизводства активной зоны (КВА)	0,85	1,04	1,046
Изменение реактивности за микрокампанию			
(330 эфф. сут), % Δk/k	-1,91	-0,38	+0,75
Максимальное выгорание топлива, % т.а. (без учета проводимых НИОКР)	~ 10	~ 8	~ 10

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

снизить запас реактивности до минимальных величин и при этом сохранить в допустимых пределах другие эффекты и коэффициенты реактивности.

Замыкание ТЦ на базе быстрых реакторов за счет использования U^{238} принципиально снимает проблему топливных ресурсов ЯЭ, увеличивая их практически используемую базу примерно в 150 раз и выводя ЯЭ на приоритетную позицию в общем энергобалансе ресурсов.

В сравнении с открытым ЯТЦ на базе ТР ЗЯТЦ с БР обладает неоспоримыми преимуществами в части меньшего количества потребляемых ресурсов, накопления ОЯТ и РАО, возвращаемых в природную среду, которые можно охарактеризовать следующими данными (табл. 5).

Исходя из этих данных следует, что замкнутый ядерный топливный цикл:

- требует в 150 раз меньше природного урана;
- при старте БР с урана в 6-7 раз больше производит вторичного топливного ре-

сурса – Pu, чем при использовании урана в ТР;

- расширяет масштаб существования ЯЭ от сотен до тысяч лет;
- позволяет либо отказаться вообще от добычи урана (при стационарном уровне общей мощности ЯЭ и работе на отвальном уране), либо при том же уровне добычи увеличить мощность ЯЭ;
- приводит к снижению потенциальной биологической опасности ВАО.

С точки зрения оптимального использования топливных ресурсов можно сформулировать следующие базовые принципы организации ЯТЦ:

- все актиниды – как Pu, так и U нужно использовать, как правило, в БР;
- использование U в ТР – рудимент становления ЯЭ;
- использование Pu в ВВЭР (МОКС) нецелесообразно по следующим причинам:

Таблица 5

**Концептуальное (по порядку величин) сравнение потребления природных ресурсов
и накопления ОЯТ и РАО в ОЯТЦ и ЗЯТЦ**

Параметр	ОЯТЦ	ЗЯТЦ	Комментарий
Годовое потребление U на 1 ГВт·год (эл)	150 т	1 т	
Потребление U за 60 лет на 1 ГВт (эл)	9 000 т	60 т	
Максимальная мощность ЯЭ при 600-700 тыс. т природного урана	68-80 ГВт (эл) в течение 60 лет	600-700 ГВт (эл) в течение 1000 лет	
Годовая добыча U при 25 ГВт (эл)	3 750 т	Не требуется	26,7 ГВт (эл) – мощность ЯЭ РФ 3100 т – добыча в РФ на сегодня
Количество образованного топливного ресурса (Pu) на 1 ГВт·год (эл)	0,15 т	1 т	
Накопление ОЯТ на 1 ГВт·год (эл)	15 т	Отсутствует	
РАО (осколки деления) на 1 ГВт·год (эл)	1 т	1 т	
Потенциальная биологическая опасность ВАО, Зв/кг ОЯТ			
Pu	~105	~100	
Am	~104	~10	

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

а) снижается база для развития ЗЯТЦ с БР;
б) ухудшаются свойства Р_и (для БР оптимален энергетический Р_и из уранового ОЯТ ВВЭР без рецикла);

в) неэффективно используется Р_и;
г) возрастает величина топливной составляющей АЭС с ТР (если не пренебрегать стоимостью Р_и).

Окончательное решение проблемы ОЯТ связано с задачами, которые решает ЗЯТЦ в части ОЯТ, и имеет три аспекта:

1) ЗЯТЦ исключает накопление ОЯТ БР;
2) поэтапный переход к ЗЯТЦ на первом этапе позволяет прекратить накопление ОЯТ ТР и уменьшить затраты на обращение с ОЯТ, так как замещение одного ТР на БР:

- исключает образование 900 т (15 т/год 60 лет) ОЯТ ВВЭР и затраты на его хранение до переработки, которые в 2015 г. в ГК «Росатом» оценивались в 384 тыс. руб./т/год;
- сокращает годовой объем перерабатываемого ОЯТ;
- сокращает объем хранения облученного урана;

3) использование продуктов переработки ОЯТ в БР – эффективный способ решения проблемы уже накопленного ОЯТ ВВЭР (на втором этапе):

- один новый БР может утилизировать трансурановые элементы из всего ОЯТ, образующегося за время жизни одного ВВЭР;
- замещение 10 ГВт тепловых реакторов быстрыми практически полностью решает проблему накопленного российского ОЯТ ВВЭР.

Радиационно-эквивалентный подход в ЗЯТЦ – основной способ решения потенциальных экологических проблем при обращении с РАО, а также главный аргумент при работе с общественностью и «радиофобией». Он фактически означает, что радиационная безопасность окружающей среды гарантируется не техническими средствами и способами, а самим отсутствием активности сверх имеющихся уже природных уровней.

Принципиальной является экономика ЯЭ, существующие проекты АЭС с ТР большой мощ-

ности по сравнению с другими генерациями в настоящее время не удовлетворяют перспективным требованиям конкурентоспособности по сравнению с электростанциями на органическом топливе. Развитие атомной генерации на базе ТР не решает системных проблем атомной энергетики. Предъявляемые требования к уровню капитальных вложений, которого планируется достичь в проекте ВВЭР-ТОИ к 2020 году, не обеспечивают задачи эффективного конкурентоспособного развития атомной энергетики в РФ, несмотря на очевидное достижение в российских условиях данной технологией предельного уровня по оптимизации технико-экономических показателей.

Основными внешними вызовами для обеспечения конкурентоспособности атомной генерации являются: модернизация существующих и внедрение новых эффективных технологий для угля и газа, появление эффективных технологий альтернативной (возобновляемой) генерации, требование к увеличению доли маневренных мощностей, уменьшение стоимости сооружения у конкурентов и тенденция к снижению цен на органическое топливо.

Значения показателя LCOE (Levelized Cost Of Electricity, приведенная стоимость электроэнергии) для конкурирующих технологий, выглядят (в ценах 2014 г., при курсе 32 руб./долл.) следующим образом:

- 1) для двухблочной АЭС с РУ типа АЭС-2006:
 - при мировом уровне цен на переделы ЯТЦ – 3,08 руб./кВт·ч;
 - при российском уровне цен на переделы ЯТЦ – 3,02 руб./кВт·ч.
- 2) для двухблочной АЭС с РУ типа ВВЭР-ТОИ:
 - при мировом уровне цен на переделы ЯТЦ – 2,74 руб./кВт·ч;
 - при российском уровне цен на переделы ЯТЦ – 2,68 руб./кВт·ч.
- 3) для ПГУ:
 - при консервативных параметрах – 3,04 руб./кВт·ч;
 - при оптимальных параметрах – 2,48 руб./кВт·ч.
- 4) для двухблочной АЭС с РУ типа БР-1200:
 - при глубине выгорания СНУП-топлива 8% т.а. – 2,42 руб./кВт·ч;

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

– при глубине выгорания СНУП-топлива 12% т.а. – 2,32 руб./кВт·ч.

5) для возобновляемых источников энергии:

– ветряная электростанция (ВЭС) – 3,23 руб./кВт·ч;

– солнечная электростанция (СЭС) – 4,85 руб./кВт·ч.

Достижение требуемых технико-экономических показателей АЭС с БР, представленных в табл. 6, позволит снизить на 20% капитальные вложения и на 15% себестоимость вырабатываемой электроэнергии по сравнению с ВВЭР-ТОИ и обеспечить конкурентные преимущества над электростанциями с органическим топливом.

Объемы высвобождаемого природного газа для экспорта или внутреннего потребления при вводе ПЭК с двумя РУ БР-1200 вместо ПГУ за весь срок службы оцениваются в 205 млрд м³ в случае ввода одного ПЭК. Только при достижении вышеприведенных требований к конкурентоспособности БР с ЗЯТЦ будет обеспечена доказательная база для крупномасштабного развития атомной энергетики на базе быстрых реакторов и замыкания ЯТЦ.

После аварии АЭС на Трехмильном острове в США (1979 г.) один из основоположников атомной энергетики в США А. Weinber в книге «The Second Nuclear Era: A New Start for Nuclear

Power» использовал концепцию «inherent safety», ранее применявшуюся в химии и электронике, как подход к конструированию реакторов и АЭС с максимальным использованием пассивных обратных связей, исключающих необходимость защитных систем, действие которых требует внешних источников энергии или вмешательства оператора. Немедленно принцип был взят на вооружение в ряде рекомендаций по безопасности МАГАТЭ и без особых технологических изменений вскоре все проекты объявлялись обладающими «внутриприсущей безопасностью». Тем не менее запас реактивности во всех конструкциях действующих ныне реакторов в разы превышает пресловутые 4 β (доля запаздывающих нейтронов), которых оказалось достаточно для разгона реактора на мгновенных нейтронах в Чернобыле. Петлевая конструкция большинства из них не исключает потери теплоносителя, а, следовательно, и отвода охлаждения от топлива, то есть аварий которые произошли на Трехмильном острове в США и АЭС «Фукусима» в Японии. Ежегодно количество извлекаемого из АЭС топлива (ОЯТ) увеличивается примерно на 12 тыс. т и до настоящего времени ни одна из стран не решила, что с ним, в конце концов, делать. Отложенное решение постепенно превращается в нарастающую проблему.

Таблица 6

Ключевые технико-экономические показатели энергоблоков АЭС с РУ БР-1200 и РУ ВВЭР-ТОИ

Показатели	БР-1200 в составе ПЭК	АЭС с ВВЭР-ТОИ
Количество энергоблоков	2	2
Мощность энергоблока, МВт(эл.)	1 220	1 250
КИУМ, %	90	90
Затраты электроэнергии на собственные нужды, %	5,0	6,5
Полезный отпуск электроэнергии, млрд кВт·ч/год	18,3	18,5
Штатный коэффициент, чел./МВт(эл.)	0,30	0,37
Срок сооружения двух энергоблоков, лет	8*	8
Срок службы, лет	60	60
Удельные КВЛ, тыс. руб./кВт	74	90
Удельные КВЛ, долл./кВт (1 долл. = 32 руб.)	2 300	2 825

Примечание: * – включая объекты ПЯТЦ.



Рис. 3. Строительство опытно-демонстрационного комплекса на площадке Сибирского химкомбината

Все перечисленные проблемы находят решение в рамках проектного направления «Прорыв». Равновесные зоны исключают необходимость запаса на выгорание, из-за которого потенциально возможны, пусть и с весьма малой вероятностью, реактивные аварии. Интегральная конструкция, при которой первый контур полностью размещается внутри бака реактора, исключает потерю теплоносителя. Выжигание и трансмутация актинидов, в том числе минорных, позволяют реализовать радиационно-эквивалентное обращение делящихся материалов в топливном цикле и вернуть для захоронения отходы, по радиотоксичности не превышающие параметры для сырьевых материалов, добываемые из Земли.

А. Weinber предложил общие подходы, в полноте реализуемые нами в конструкциях реакторов и технологиях замыкания топливного цикла. Это позволило нам дать ядерной энергетике, использующей для безопасности новые физические подходы и конструктивные решения, вместо активных систем безопасности, название «ядерной энергетике естественной безопасности». С ее развитием мы связываем решение энергетических, экологических и ресурсных проблем устойчивого развития, как это и предлагал Президент РФ В.В. Путин в 2000 г. на Саммите тысячелетия в ООН.

Прообраз ядерной энергетике будущего сооружается на площадке Сибирского химического комбината (рис. 3), объединяя усилия специалистов ГК «Росатом», университетов и институтов РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. Одобрена Правительством РФ 25.05.2000 г. М.: Минатом России, 2000.

2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 1715-р от 13 ноября 2009 года.

3. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В., Молоканов Н.А., Муравьев Е.В., Орлов В.В., Калякин С.Г., Рачков В.И., Троянов В.М., Аврорин Е.Н., Иванов В.Б., Алексахин Р.М. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. // Атомная энергия. 2012. Т. 112. Вып. 6. С. 319-330.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

4. Аналитическая записка «Крупномасштабная двухкомпонентная ядерная энергетика с замкнутым ЯТЦ на базе реакторов на быстрых нейтронах». М., ГК «Росатом», Проектное направление «Прорыв», 2017.

5. В.И. Рачков. Формирование двухкомпонентной ЯЭ в рамках стратегии развития ЯЭ России. Доклад на совместном заседании НТС-1 и НТС-8 ГК «Росатом», Москва, 23.03.2017.

6. Е.О. Адамов, В.А. Першуков. Проект «Прорыв» (достигнутые результаты и дальнейшее развитие технологий ЗЯТЦ). Доклад

на конференции ПН «Прорыв», Екатеринбург, 07.06.2016.

7. E.O. Adamov, V.A. Pershukov. PROJECT «PRORYV» (Breakthrough): Results achieved and further development of closed nuclear fuel cycle technologies (Federal Target Program «Nuclear Power Technologies of the New Generation» and the concept of the Federal Target program «Nuclear Power Technologies of the New Generation-2»). Доклад на АТОМЭКСПО-2016, Москва, 30.05.2016.

8. A. Weinber. «The Second Nuclear Era: A New Start for Nuclear Power», Praeger, New York, 1985.

Поступила в редакцию
24.05.2017 г.

E.O. Adamov, D.S. Solovyov²

NUCLEAR POWER INDUSTRY – CHALLENGES AND PROBLEM SOLUTION

The article reviews the problems of modern nuclear power industry (NPI) development and their solutions based on the closed nuclear fuel cycle (NFC) with fast reactors (FR). Technical requirements to nuclear energy systems are established to develop a large-scale nuclear power industry. The paper covers objectives as well as research and engineering problems to be solved in the Proryv (Breakthrough) Project implemented by the State Atomic Energy Corporation Rosatom as part of the Federal Targeted Program «New-Generation Nuclear Energy Technologies for the 2010-2015 Period and up to 2020».

The required performance indicators of nuclear power plants with fast reactors are evaluated to achieve competitive advantages over fossil fuel power stations.

Key words: nuclear power industry, fast reactors, closed fuel cycle, large-scale nuclear power industry, irradiated nuclear fuel, security, non-proliferation, Proryv Project.

² Evgeny O. Adamov – Academic Director of the Proryv Project – the Innovation and Technology Center of the State Atomic Energy Corporation Rosatom, Academic Director of JSC «NIKIET», Doctor of Engineering, Full Professor, e-mail: aeo@proryv2020.ru;
Dmitry S. Solovyov – Research Secretary at the Technical Committee of the Innovation and Technology Center for the Proryv Project of the State Atomic Energy Corporation Rosatom, e-mail: sds@proryv2020.ru

УДК 621.039

В.В. Иванов, А.В. Путилов¹

ЦИФРОВОЕ БУДУЩЕЕ: СЛЕДУЮЩИЙ ШАГ В РАЗВИТИИ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В статье дана оценка перспектив реализации принципов цифровой экономики в энергетике, включая атомную энергетику, которая показывает широту и глубину новых решений для всей энергетической экосистемы и также требует сосредоточенности на работе с потенциальными заказчиками. Инновационная экономика, реализуемая в энергетической сфере, дает возможность получать новые виды продукции и новые типы услуг, привлекает и обеспечивает подготовку высококвалифицированных специалистов и дает возможность занять дополнительную долю мирового рынка.

Ключевые слова: цифровая экономика, атомная энергетика, инновации, информационное моделирование, большие данные, энергоэффективность.

Введение

Анализ мирового инновационного развития показывает, что одним из главных векторов технологического развития является создание качественно новых систем управления и организации производства на базе цифровых платформ, вытесняющих с рынка и из производства неэффективных посредников и заменяющих их эффективными алгоритмами. Существует тезис о том, что подключение к цифровым платформам дает субъектам рынка такие конкурентные преимущества, что в полной мере начнет срабатывать принцип «кто не с нами, тот банкрот». Сопоставления американского и китайского подходов к развитию цифровой экономики явно свидетельствуют в пользу китайской модели, а нехитрая экстраполяция показывает, что к 2035 г. эти два мировых лидера по цифровым платформам захватят не менее 90% рынков планеты. И если не ответить на вызов чем-то существенным, то места для России в этом дележе рыночного пирога не найдется. Тренды и тенденции в области энергетики [1-4] показывают, что эта сфера реального сектора экономики может быть в ближайшее время вовлечена в формирование цифровых экономических платформ. Поскольку атомная отрасль наряду с авиакосмической является не только одной из самых технологически развитых, но и одной из самых сложных для восприятия, можно считать целесообразным

провести оценку перспектив «цифровой революции» на ее примере.

Цифровая экономика и энергетика

Экономику с давних времен описывали в наглядных образах железной дороги: экономические рельсы, локомотивные компании, магистральные направления и пр. Сегодня к этой железнодорожной аллегории добавилось новое явление, которое грозит перестроить не только график движения к успеху в бизнесе, но и перекрыть весь ландшафт современного рынка, каким мы его знали. Это новое явление – цифровые платформы: они стирают границы между отраслями, формируют новые неожиданные индустриальные альянсы, даже новые индустрии. Они полностью меняют представление о конкуренции, вплоть до ее полного устранения. Компании, выбравшие «платформенный» формат ведения бизнеса – одни из самых быстрорастущих и капитализирующихся. Как это ни парадоксально звучит, но сегодня задача любого дальновидного предпринимателя заключается вовсе не в том, чтобы занять место в первом вагоне размеренно идущего по накатанным рабочим рельсам локомотива, а успеть запрыгнуть на ту или иную стремительно набирающую обороты платформу, а то и создать собственную. Инновационная деятельность в энергетике [5-7] должна обеспечивать возможность форми-

¹ Владимир Викторович Иванов – заместитель Президента РАН, чл.-корр. РАН, д.э.н., к.т.н., профессор НИЯУ МИФИ, e-mail: Ivanov@presidium.ras.ru;

Александр Валентинович Путилов – декан факультета бизнес-информатики и управления комплексными системами НИЯУ МИФИ, д.т.н., профессор, e-mail: AVPutilov@mephi.ru

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

рования цифровых экономических платформ в различных энергетических сегментах.

По сути, цифровая платформа – это бизнес-модель, полностью основанная на высоких технологиях, которая создает прибыль за счет информационного обмена между двумя или более независимыми группами участников. В базовой комплектации платформы сводят напрямую производителей и конечных потребителей, которые получают возможность взаимодействия без посредников. Также они дают возможность различным компаниям делиться информацией и таким образом существенно улучшать сотрудничество и создавать инновационные продукты и решения. Сегодня, когда сложность новейших технологий увеличивается прямо пропорционально росту их доступности, все больше и больше компаний, независимо от масштабов и направлений деятельности, встают на новый путь ведения и развития бизнеса, основанный на «облачных» приоритетах (Cloud First – магистральный тренд ведущих экономик планеты). Два ключевых принципа платформенного бизнеса – сервисный формат продукта (everything-as-a-service / все как сервис) и гибкий формат оплаты (pay-as-you-go / плати по ходу) – обеспечивают невиданную прежде скорость вывода новинок на рынки и обещают гораздо более богатый, позитивный и продуктивный опыт для миллионов потребителей. Государственные корпорации [8-10] в нашей стране в значительной степени являются «локомотивами» в отдельных направлениях высокотехнологичного роста (атомная энергетика, космос, ОПК и пр.) и переход на качественно новый информационный формат экономических отношений потребует от организации производства значительной организационной перестройки, что позволит оптимизировать систему управления и повысить экономическую эффективность. При использовании цифровых платформ прибыль возрастает пропорционально количеству участников. При этом больше провайдеров различных сервисов и продуктов на базе одной платформы привлекают больше конечных пользователей, которые, в свою очередь, привлекают новых производителей и провайдеров.

Возникающая в ходе такого цифрового экономического взаимодействия среда носит на-

звание экономической экосистемы, представляющей собой адаптивную сеть независимых участников и групп, развивающуюся путем совместного создания инновационных решений и технологий, новых видов продукции.

Экономическая модель индустриального периода развития представляла собой классический рынок производителя и продавца, в котором главное было создать и монополизировать производственные мощности и процессы. В условиях «информационного изобилия» индустриальная монополизация крайне затруднена. Это же относится и к энергетике. Цифровые технологии могут разрушать и трансформировать традиционную электроэнергетику, бросая вызов старым моделям функционирования и открывая беспрецедентные возможности для новых. Хотя цифровые технологии проникли повсюду, энергетическая промышленность по-прежнему представляет огромные возможности по их внедрению. Использование цифровых технологий в системе генерации и распределения электроэнергии, в совокупности с новейшим оборудованием, позволит повысить экономическую эффективность, надежность, безопасность и экологичность энергетической отрасли в целом.

Традиционные игроки электроэнергетической отрасли признают, что в настоящее время идут перемены, и ищут новые решения и партнеров для новой цифровой эпохи. Есть и новые, и старые игроки, которые примеряют цифровые технологии, новые правила создают новые требования, а новые бизнес-модели, ограничивая традиционные источники прибыли, создают новые возможности для роста. Например, американская компания General Electric разработала проект цифровой электростанции (DPP). В DPP физические преимущества высокоэффективных газовых турбин с воздушным охлаждением дополняются мощными цифровыми инструментами повышения надежности, готовности и оптимизации режима эксплуатации для достижения низких производственных затрат.

Новые потоки прибыли можно получить теперь за счет удовлетворения новых требований сети, регулирования частоты на рынке вспомогательного оборудования и компромиссов в реальном времени между более быстрыми запусками, сроками эксплуатации деталей и требованиями сети.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Управление эффективностью производственных активов – это пакет облачного программного обеспечения (ПО) и сервисных решений, которые работают со всем оборудованием, всех производителей и всех отраслей промышленности как на одной электростанции, так и на всех предприятиях заказчика. Эти решения предназначены для контроля состояния машин и оборудования, управления надежностью и оптимизации техобслуживания, что позволяет промышленным компаниям, для которых оборудование является критическим активом, увеличить периоды непрерывной работы, снизить затраты и эксплуатационные риски. Оптимизация эксплуатационной активности – это облачный пакет ПО, который обеспечивает анализ по ключевым показателям эффективности (КПЭ) и работает с внутренними данными электростанции, архивами данных об эксплуатации или с внешней информацией, предоставляя предупреждающие рекомендации для информирования ключевых ресурсов, снижения производственных затрат и улучшения гибкости производства. Каждый уровень действий можно отследить по всей системе, что ведет к пониманию и внедрению оптимальных режимов эксплуатации.

Упомянутая компания General Electric разработала систему оптимизации бизнеса – это

облачный пакет ПО, который позволяет производителям энергии воспользоваться всеми преимуществами прогнозной аналитики, для поддержки принятия решений о торговле энергией, покупке топлива и управления своим портфелем предложений. Модули могут прогнозировать производительность электростанции и динамику рынка, чтобы максимизировать прибыль. При этом обеспечивается оптимизация работы за счет планирования простоя и работы, сопоставляя их с такими факторами, как рыночные условия, колебания нагрузки/спроса, прогнозом погоды, прогнозом динамики цен на топливо, ограничения по передаче и соотношения цен на топливо и энергию.

Решение по оптимизации и управлению распределением энергии принимаются на основе данных экспертного аудита существующих систем отопления, вентиляции и кондиционирования, освещения и оборудования на специально разработанной платформе Predix. Это цифровое решение позволяет покупать энергию по лучшей цене, эффективно управлять энергией с использованием активов, внедрять интеллектуальное развитие на основе производительности активов, принимать лучшие решения о приоритетах ремонта и замены узлов, а также быть уверенным в том, что в счетах за электроэнергию отсутствуют ошибки.

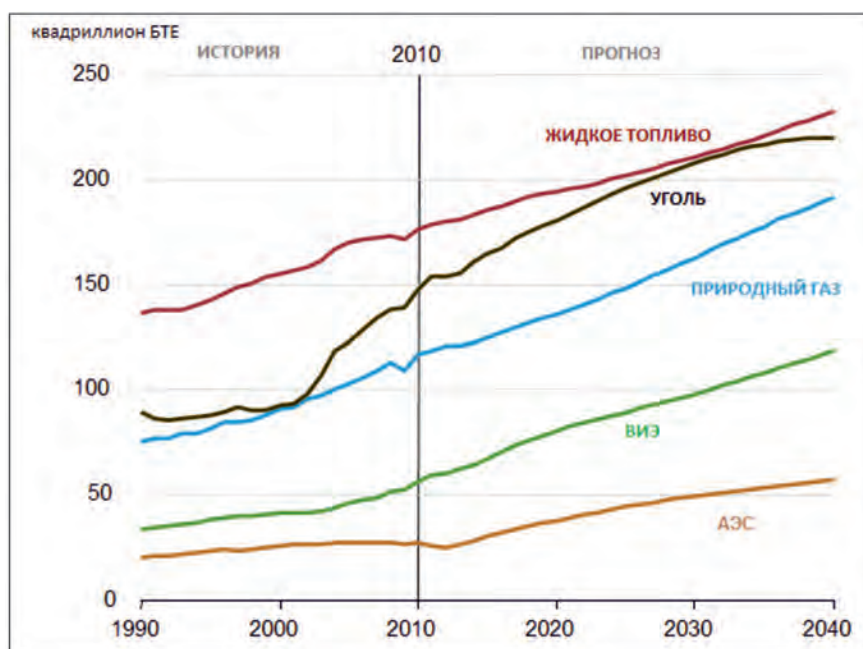


Рис. 1. Прогноз мирового энергопотребления за счет различных энергоисточников

Перспективы развития мировой энергетики оценивались и прогнозировались многократно. На рис. 1 приведен результат одного из прогнозов, выполненного в 2010 г., сходимость с реальной действительностью в 2017 г. – наибольшая из всех известных. Главное в этих прогнозах – набор энергетических технологий, конкурирующих между собой и дополняющих друг друга, которые будут существовать еще долгое время. Этот набор нуждается в обеспечении инструментарием цифровой экономики.

Компании-платформы как основа нового экономического уклада

В эпоху цифровой экономики назревает платформенная революция: возникают платформенные компании, которые основаны на принципиально иной экономической модели – рынке потребителя, всецело подчиненного спросу и потребностям этих потребителей. В этой новой модели компании могут пользоваться ресурсами и мощностями, которые им не нужно приобретать в качестве физических активов. Так, около 38000 разработчиков пользуются платформой Apple iOS AppStore, для которой уже создали порядка 1,5 млн приложений, скачанных впечатляющие 100 млрд раз (в пятнадцать раз больше, чем жителей Земли). Это принесло владельцу платформы 33 млрд долл. на конец 2015 года. Эти новые компании представляют следующее поколение лидеров рынка после суперуспешных интернет-компаний. Интернет, как одно из средств и ресурсов, входит в сеть платформенной инфраструктуры. Сегодня специалисты выделяют около 140 «единорогов» (так на рынке называют компании, вышедшие на уровень в 1 млрд долл. привлеченных инвестиций в первые три года существования), которые работают преимущественно на платформенной модели.

В соответствии со сложившимися в мировом сообществе принципами развития цифровой экономики компания-платформа – это базовое звено нового экономического уклада. Понятие «платформа» означает способность предлагать и реализовывать ценностное предложение (value proposition) для конкретного заказчика или клиента на базе открытого источника (open source) решений, машинного обучения (тренировки ис-

кусственного интеллекта на уже решенных задачах), облачных решений и других современных услуг с заданным уровнем безопасности.

Экосистема цифровой экономики включает структуры, которые можно охарактеризовать как digital-организации, основанные на технологических платформах, позволяющих в режиме реального времени на основе больших данных (Big Data) формировать лучшие предложения для клиентов и заказчиков за счет подключения внешних провайдеров и использования мировых ресурсов. Сетевые блокчейн-технологии формируют новое пространство доверия для оцифрованных больших баз данных – кадастров, реестров собственности и пр. Все эти примеры относятся к информационному и финансовому бизнесу, но и промышленные компании также начинают заниматься цифровой экономикой.

Производственные структуры постепенно формируют собственные цифровые платформы. Так, цифровая платформа корпорации Boeing была продемонстрирована на одной из выставок на примере разработки боевых самолетов. Цифровой шлюз авиационной системы обмена тактической информацией, установленный на борту самолета F-18, представляет собой отдельное независимое устройство, позволяющее конструкторам Boeing испытывать новое программное и аппаратное обеспечение без внесения изменений в другие системы и узлы самолета. Это дает возможность осуществлять недорогие и более безопасные испытания новых систем и открывает путь к быстрой разработке срочных решений, в которых нуждается, например, ВМС США. Роль бортового сенсора, позволяющего получить изображение цели с высоким разрешением, в данной демонстрации играла учебная версия ракеты «воздух-земля» Maverick производства корпорации Raytheon.

Цифровой промышленный путь General Electric базируется на использовании технических данных и аналитики, собранных на протяжении более двадцати лет, для мониторинга и оптимизации промышленных активов. Более миллиарда долларов этой компанией вложено в программное обеспечение и аналитические исследования, открыт центр создания программного обеспечения в Сан-Рамоне, Калифорния.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Использование больших объемов данных, аналитики, датчиков и сетей создает промышленный «интернет вещей», в котором отражена практически каждая единица оборудования и корпоративный технологический процесс. При работе с корпоративной платформой Predix, заказчики могут по-новому видеть, контролировать и анализировать всю свою энергетическую систему и управлять ей, а также поставлять свою продукцию более эффективно, надежно и безопасно. По предварительным оценкам, такой платформенный подход позволит сэкономить до 75 млрд долл. для мировой энергетической отрасли. Цифровая экономика позволяет трансформировать современную энергетическую промышленность: планируется создавать цифровые электростанции, самые большие и эффективные газовые турбины, полный спектр общестанционного оборудования, а также решения по модернизации и обслуживанию для повышения производительности оборудования головной компании и сторонних производителей.

В рамках платформы для крупных объектов формируется так называемый «цифровой близнец»: инженерно-экономическая модель, которая постоянно увеличивает объем информации, получаемой от активов, необходимой для бизнес-процессов. Эти модели постоянно совершенствуются с помощью получаемых данных, чтобы с помощью этих моделей можно было отслеживать рабочее состояние и оставшийся срок службы каждого актива. Таким образом, на примере General Electric можно проследить как индустриальный энергетический холдинг трансформируется в цифровую промышленную компанию, совмещая собственный опыт в наиболее важных промышленных отраслях с современными цифровыми возможностями, формируя наряду с центром разработки цифровых решений в Калифорнии и дополнительные центры в Париже, Шанхае и Саудовской Аравии. Глобализация в энергетике идет цифровым путем.

Цифровой шаг в развитии атомных технологий

Во всех мировых энергетических прогнозах атомная энергетика занимает определенную долю энергобаланса и имеет свою экологиче-

скую нишу: это энергетика промышленно развивающихся регионов. Определенный опыт цифрового вклада в атомные технологии в Госкорпорации «Росатом» имеется. На фоне того, что большинство энергоблоков АЭС до 2030 г. госкорпорации предстоит построить за рубежом, возникает ряд экономических вызовов:

- усиление конкуренции со стороны китайских и корейских компаний;
- необходимость снижения сроков сооружения атомных станций;
- крайняя нужда в уменьшении стоимости строительства.

Помочь в решении этих проблем может переход к проектному информационному моделированию: эффективные системы управления сооружением позволяют контролировать сроки, стоимость и качество строительства – то, что волнует и каждого заказчика, и каждого исполнителя. А тот, кто научится строить качественно, в срок и дешево в конечном счете одержит победу и в глобальной конкуренции.

Однако применение цифровых технологий, в свою очередь, влечет за собой новые вызовы. Появляются новые профессии, повышаются требования к компетенциям и знаниям проектировщиков. Новые технологии – новые стандарты их применения. И если какая-то технология уже широко вошла в жизнь большей части мира или групп стран, то остальным придется под них подстраиваться. Основные атомные конкуренты России: Китай, Корея и Франция, уже создали свою международную цифровую ассоциацию Building Smart. Они более пяти лет разрабатывают общий стандарт, работают в единой среде, делают единую информационную платформу. Все это увязано и со стандартами Евросоюза: во многих европейских странах информационное моделирование уже введено как обязательное условие.

Информационная модель нужна современному заказчику не только на стадии строительства объекта, но и в процессе дальнейшей эксплуатации. Поэтому в цифровую модель включается вся информация об объекте: как его спроектировали, создали, построили, какой результат будет получен и как обеспечивать эффективный процесс эксплуатации длительностью минимум 60 лет. Для примера можно указать, что при

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

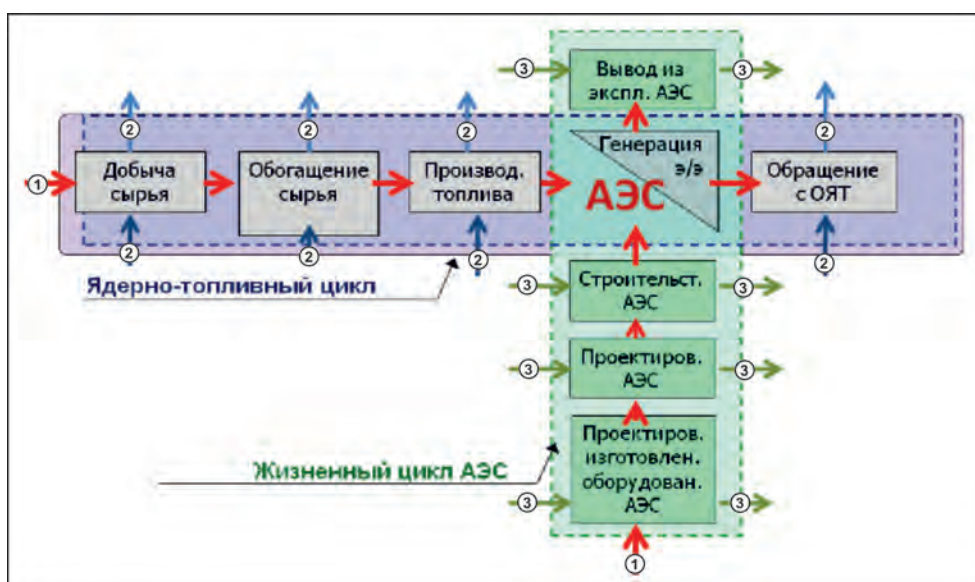
строительстве АЭС «Ханхикиви» (Финляндия) Госкорпорация «Росатом» использует технологию Multi-D.

Имеется трехмерная модель, она информационно насыщена. Есть также множество расчетов, обоснований, информации о том, кто, когда и как сделает то или иное. Multi-D – это не просто информационная модель, а набор взаимосвязанных технологий моделирования и управления, который отработан на проектах строительства АЭС: начиная от 3D-моделирования объекта и заканчивая отслеживанием в реальном времени передвижения рабочих и оборудования на основе использования специальных чипов. Multi-D – это своеобразный бренд Госкорпорации «Росатом», инструмент управления с использованием информационной модели, который сейчас распространяется и на другие проекты. Вместе с тем не стоит поддаваться иллюзии о том, что информационное моделирование позволит автоматизировать деятельность проектировщиков: чтобы собрать информационную модель, нужно пройти весь традиционный путь проектирования.

Развитие атомной энергетики и цифровая экономика

Если в текущем «атомном развитии» цифровые технологии постепенно занимают достойное место, то для цифровой экономики перспективного развития энергетики требуются новые подходы. Прежде всего, надо «оцифровать» достаточно длительные жизненные циклы: ядерных энергоресурсов и атомных энергоблоков. Так, технология Multi-D в определенной мере позволяет моделировать жизненный цикл конкретной АЭС, однако переход на новые технологические принципы требует изменения и в системах моделирования. Например, создание замкнутого ядерного топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах (проект «Прорыв») требует учета не только новых типов реакторных установок, но и нового ядерного топлива, его получения и переработки.

Ряд специалистов предлагают при формировании облика цифрового будущего атомной энергетики использовать принцип «экономического креста» [11-14]. Этот достаточно жаргонный термин обозначает пересечение жизнен-



Красные стрелки ① означают последовательность «технологических переделов» ЯТЦ и АЭС, синие ② и зеленые ③ стрелки – взаимодействие предприятий с внешними поставщиками или потребителями, включая экспорт, импорт и т.п.

Рис. 2. «Экономический крест» как перекресток двух жизненных циклов: ядерного топливного цикла и машиностроительного цикла АЭС



LCOE – значения приведенной стоимости электроэнергии, при котором окупаются расходы на протяжении жизненного цикла АЭС с учетом дисконтирования.

Рис. 3. Планируемые денежные потоки и риски, возникающие при формировании экономических отношений в процессе создания объектов использования атомной энергии

ных циклов ядерных энергоресурсов и атомных энергоблоков (рис. 2). Главное в этом принципе то, что на пересечении жизненных циклов происходит выработка целевой продукции (электроэнергии, тепла, иногда и опресненной воды), а на остальных сторонах формируются затраты. Поэтому цифровая экономика должна показать, как с учетом разновременности затрат (принцип дисконтирования) итоговый экономический эффект будет превышать всю совокупность затрат.

Кроме того, существуют риски, например, информационный риск противодействия через СМИ работе энергетических объектов, которые также могут быть оценены с помощью методов цифровой экономики. На рис. 3 представлена схема оценки, которая может быть выполнена с использованием методов цифрового моделирования. В частности, были выполнены исследования показывающие экономические характеристики информационных рисков возведения АЭС за рубежом [17].

Главное при формировании цифрового взгляда в будущее – использование высококвалифицированных экспертов, современных методик, мощных вычислительных средств. Сегодня всем этим набором обладают ведущие научные организации и университеты, среди которых в области атомной энергетики выделяется НИЯУ

МИФИ, занимающий в последние годы ведущие места в международных рейтингах. Возможно, целесообразно в ближайшем будущем формирование университетов-платформ, также как в промышленности происходит создание платформенных производственных систем. Цель создания университета-платформы на базе НИЯУ МИФИ: комплексное образовательное обеспечение развития цифровой экономики в энергетике, прежде всего – атомной, высокотехнологичной ядерной биомедицине, сопутствующих технологиях. Это развитие цифровой экономики в указанных сферах должно обеспечить повышение конкурентоспособности отечественной атомной индустрии на глобальных мировых рынках, переход к инновационному развитию и экономике знаний, повышение качества и уровня жизни граждан страны.

Будущая сетевая структура, которую можно охарактеризовать как платформа в цифровой экономике в области энергетики, может быть наполнена целым рядом разработок НИЯУ МИФИ. Для примера можно упомянуть:

- цифровые модели уранового рынка и экономика транзакций типа «голландские аукционы»;
- экономический анализ новых информационных рисков при создании АЭС за рубежом;

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

- цифровые модели интегрированных продаж АЭС на мировом рынке и пр.

Выпущены рекомендации по итогам проведенной 5-6 апреля 2017 г. в НИЯУ МИФИ в содружестве с корпорацией Cisco Международной конференции, на которой обсуждались «интернет вещей», технологии блокчейн и другие элементы цифровой экономики, применительно к образовательному процессу и подготовке кадров [15, 16].

Пределом целесообразной масштабируемости в цифровой экономике является отраслевая платформа, причем отрасль должна рассматриваться в контексте глобального разделения труда. Важен вопрос о границах охвата цифровыми платформами того или иного сегмента экономики: современные цифровые платформы в состоянии глубоко автоматизировать производства и рынки тех товаров и услуг, характеристики которых поддаются жесткой количественной или качественной параметризации. Цифровая платформа в области перспектив развития атомной энергетики вполне логично смотрится на фоне аналогичных зарубежных разработок.

Главным предметом начала процесса «цифрового реформирования» является проблема субъекта этого «информационного реформирования» с учетом интересов государства: как достичь синергии несочетаемых, казалось бы, в одном лице качеств – компетентности, заинтересованности и полномочий. Решением этой проблемы может быть массовое образовательное обеспечение развития цифровой экономики – оно позволит обеспечить необходимыми компетенциями и заинтересованных и полномочных участников процесса развития цифровой экономики. Для образовательного обеспечения развития цифровой экономики необходимо корректно ввести понятие «платформа»: нужно осмыслить фундаментальный сдвиг мировой экономической мысли в понимании, что такое хозяйственная деятельность по своей сути. Это позволит разработать понятие платформы в контексте современного понимания хозяйственной деятельности – тогда и в теоретических разработках, и в практических реализациях идеи «платформы» у России может появиться реальный шанс участия в мировой цифровой революции.

Суть современной эпохи – вытеснение машинами неэффективных человеческих транзакций из экономической и общественной жизни, а самая выигрышная стратегия – поиск точек возможной автоматизации в «зоне ближайшего развития» с разумным опережением мировых трендов не более чем на несколько месяцев. Догоняющая стратегия обречена на неудачу, и только глубокая теория дает возможность ухватить тренд и забежать вперед [18, 19]. Существует соображение о том, что для поиска российского пути принципиально недостаточно анализа и сопоставления зарубежного опыта: рамки осмысления проблемы должны быть существенно расширены.

Изначально цифровые платформы были прерогативой высокотехнологичных компаний из числа тех, что принято называть «цифровыми аборигенами» (digital natives), то есть возникших в эпоху «интернетизации» и потому счастливо избежавших необходимости перестраиваться и адаптироваться к новому цифровому миру, формату работы и стратегии бизнеса: таких как Google, Amazon, Facebook, Uber. Теперь цифровые платформы, которые стремительно становятся передовым форматом экономики и наиболее перспективной бизнес-моделью, открыты для самого широкого круга участников. Тренд нарастает, и аналитики ожидают, что через год-два более 50% крупных мировых компаний создадут собственные или присоединятся к партнерским цифровым платформенным экосистемам. Прежним лидерам рынка для достижения миллиардной капитализации требовалось в среднем 20 лет. Сегодняшние цифровые стартапы справляются с этой задачей всего за 3 года. И цифровые платформы играют в этом фундаментальную роль.

В основе цифровой платформенной модели бизнеса – три ключевых условия.

Сетевой эффект. Сводя вместе участников рынка, платформы способствуют постоянному циклическому наращиванию объемов: большее количество потребителей привлекает все больше продавцов и партнеров, и наоборот. Это смещает затраты и риски с самих бизнесов на сеть. По мере того как сеть набирает обороты, оператор и владелец действует как дирижер, распределяя нагрузку между все большим количеством участников.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Согласованность технологий. Облака, автоматизация, аналитика, искусственный интеллект, «интернет вещей» в синергии создают принципиально новую «сервисную экономику» (everything-as-a-service – все как сервис), в которой продукты и услуги поставляются на рынок быстро, динамично, по требованию, оплачиваются по реальному объему пользования и гибко масштабируются в зависимости от текущих потребностей клиента. Особое преимущество такие интегрированные «фабрики сервисных возможностей» предоставляют небольшим или начинающим предпринимателям, которым для выхода на масштабные новые рынки не нужно создавать собственную производственную инфраструктуру.

Открытость данных. Это один из ключевых аспектов: прежде тщательно хранимые в качестве коммерческой тайны данные, получаемые от операций и транзакций на платформе, открыты и доступны не только всем участникам, но и новым претендентам. Имея доступ к огромному потоку актуальной информации о потребителях, все новые и новые участники могут разрабатывать все новые и новые предложения и сервисы. А поскольку разработки изначально основаны на данных уже работающих сервисных опций, новинки «бесшовно» интегрируются в существующую экосистему.

Хотя платформы чаще всего являются коммерческими, сама возможность их создания и продуктивного развития во многом зависит от государства. Ведущая аналитическая и прогностическая компания Accenture выработала алгоритм оценки готовности стран к платформенной модели бизнеса и выявила пять ключевых факторов, которым необходимо соответствовать.

- Количество и качество («продвинутость») пользователей цифровых технологий: преимущество – за странами с широкой цифровой пользовательской базой и однородной культурной, языковой и правовой средой.
- Цифровое предпринимательство: наличие и удельный вес научных, инженерных, математических и технологичных направлений в структуре экономики, качество их воспроизводства и роста.

- Технологическая готовность: количество инвестиций в высокотехнологичные направления – такие как индустриальный интернет вещей или искусственный интеллект.
- Открытая инновационная культура: правила и нормы работы компаний, позволяющие открытое взаимодействие с широким кругом разнообразных разработчиков и партнеров.
- Гибкая регуляция: участие государства в управлении процессами правового обеспечения платформенных моделей – в частности, авторские права, конфиденциальность данных и кибербезопасность.

Инжиниринговые аспекты развития атомной энергетики

Системы автоматизированного проектирования стали первым шагом на пути к 2-D и 3-D проектированию, способствующему переходу от чертежей к моделям, объектам и взаимодействиям, от бумажных носителей к цифровым. Таким образом, была сформирована новая концепция информационного моделирования сооружений. Информационное моделирование сооружений (Building Information Modelling, BIM) – процесс коллективного создания и использования информации о сооружении, формирующий надежную основу для всех решений на протяжении жизненного цикла объекта (от самых ранних концепций до рабочего проектирования, строительства, эксплуатации и сноса). По своей сути это трехмерная модель здания, либо другого строительного объекта, связанная с информационной базой данных, в которой каждому элементу модели можно присвоить дополнительные атрибуты. В настоящее время разрабатываются платформы управления жизненным циклом объектов строительства. Они основываются на сочетании BIM-данных с функциями и процессами PLM (PLM-система, product lifecycle management) – прикладное программное обеспечение для управления жизненным циклом продукции). Они ориентированы на повышение прогнозируемости строительных работ, получение долгосрочной прибыли владельцами зданий/сооружений и выгоду для всех участ-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

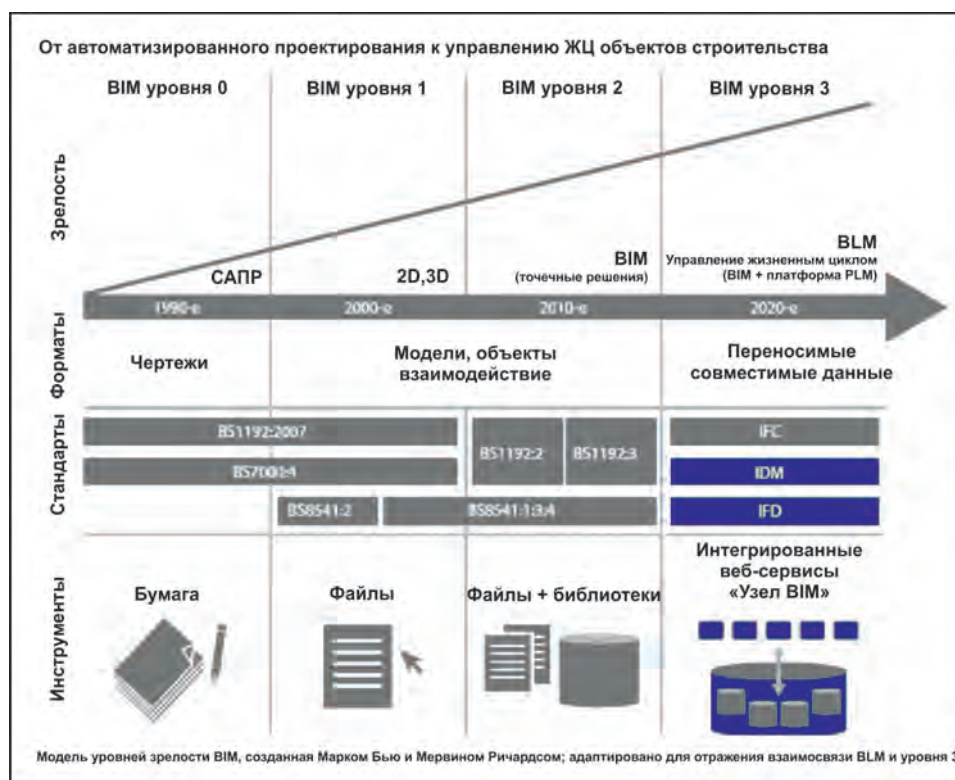


Рис. 4. Динамика перехода от автоматизированного проектирования к управлению жизненным циклом сложных объектов

ников проектно-строительной деятельности. Благодаря полнофункциональной PLM-системе создается среда для эффективной координации архитектурно-строительной информации. Объединение данных BIM с PLM-системой (рис. 4) позволяет сформировать систему управления жизненным циклом объектов строительства (Building Lifecycle Management – BLM). Основные преимущества использования BLM – это повышенная производительность, экологичность, качество работ, сокращение объемов брака, снижение рисков и экономия средств. Основой для достижения этих преимуществ является способность BLM-систем ограничивать масштабы доработок в проектах, сокращать число запросов информации, хранить данные централизованно, выдавать информацию в контексте и точно прогнозировать результаты. Специалисты группы компаний «Атомстройэкспорт – АСЭ» (инжиниринговый дивизион Госкорпорации «Росатом») создали уникальную цифровую систему управления проектами Multi-D на Ростовской АЭС. Эта разработка признана лучшей в номинации «мегапроект» международного конкурса

«CETI AWARD – 2016». Организатором конкурса традиционно выступает одно из наиболее авторитетных в мире промышленных объединений FIATECH, которое еще пятнадцать лет назад разработало дорожную карту (RoadTech Map) системы управления жизненным циклом сооружений будущего. Конкурсные проекты рассматривало международное жюри, которое по достоинству оценило российскую разработку. Цифровая платформа Multi-D, созданная специалистами группы АСЭ, позволяет эффективно управлять всеми этапами жизненного цикла АЭС – от проектирования до вывода из эксплуатации. Система интегрирует информацию о проекте, помогает управлять поставками, сроками, объемами, ресурсами и качеством. Решения на ее базе сегодня тиражируются на все объекты в портфеле заказов АСЭ. Кроме того, они доступны для реализации любых видов сложных капитальных проектов. Победа российской технологии в номинации «мегапроект» свидетельствует, что стратегия развития системы управления жизненным циклом в атомной отрасли России формирует мировые тенденции

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

в этой сфере цифровой экономики. Признание Multi-D на международном конкурсе «CETI AWARD – 2016» подтверждает ведущие позиции отечественной атомной отрасли на рынке проектирования и строительства АЭС.

Заключение

Оценка перспектив цифровой экономики показывает широту и глубину новых решений для всей энергетической экосистемы, а также демонстрирует сосредоточенность на работе с потенциальными заказчиками. Мировые лидеры пытаются найти свой путь в структурных

трансформациях каждой конкретной отрасли реального сектора экономики. Инновационная экономика дает новые виды продукции и услуг, прекрасных специалистов и дополнительную долю мирового рынка. Доступ к энергии – это одно из базовых прав человека, и мы верим, что в будущем каждый человек или промышленное предприятие на планете будут пользоваться более доступной, надежной и экологически безопасной энергией. Наука и образование – два ведущих проводника в формировании нового технологического уклада, а цифровая экономика энергетики – это мировое будущее, к нему надо сознательно стремиться и постоянно формировать его основы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рифкин Д. Третья промышленная революция: Как горизонтальные взаимодействия меняют энергетику, экономику и мир в целом / М.: Альпина нон-фикшн, 2015. 410 с.
2. Daheim C., Uerz G. Corporate foresight in Europe: from trend based logics to open foresight // *Technology Analysis & Strategic Management*. 2008. Vol. 20, № 3. P. 321-336.
3. Путилов А.В., Воробьев А.Г. Принципы формирования «экономического креста» в прогнозировании развития атомного энергопромышленного комплекса // *Экономика в промышленности*. 2013. № 1. С. 35-40.
4. Абрамова Е.А., Апокин А.Ю., Белоусов Д.Р., Михайленко К.В., Пенухина Е.А., Фролов А.С. Будущее России: макроэкономические сценарии в глобальном контексте // *Форсайт*. 2013. Т. 7, № 2. С. 6-25.
5. Путилов А.В., Воробьев А.Г., Стриханов М.Н. Инновационная деятельность в атомной отрасли. Кн. 1. Основные принципы инновационной политики. М.: Руда и Металлы, 2010. 184 с.
6. Лукьянчиков Н.Н. Природная рента и охрана окружающей среды. М., 2004. 129 с.
7. Сидоренко В.А. О стратегии ядерной энергетики России до 2050 года // *Росэнергоатом*. 2012. № 6. С. 9-18.
8. Путилов А.А., Воробьев А.Г., Путилов А.В., Гольдман Е.Л. Государственные корпорации и развитие высокотехнологичных отраслей реального сектора экономики: исторический обзор и мировой опыт // *Экономика в промышленности*. 2009. № 2. С. 2-13.
9. Путилов А.А., Воробьев А.Г., Путилов А.В., Гольдман Е.Л. Государственные корпорации и развитие высокотехнологичных отраслей реального сектора экономики: экономические преимущества и роль в промышленной модернизации // *Экономика в промышленности*. 2009. № 3. С. 13-21.
10. Ильина Н.А., Путилов А.В. Анализ становления, текущее состояние и перспективы развития основных участников мирового инновационного атомного рынка // *Инновации*. 2012. № 9. С. 10-15.
11. Путилов А.В., Быковников И.Л., Воробьев Д.А. Методы технологического маркетинга в анализе эффективности технологических платформ в области энергетики // *Инновации*. 2011. № 2 (148). С. 82-90.
12. Путилов А.А., Воробьев А.Г., Путилов А.В. Экономические характеристики уранового сырья в дореакторном технологическом переделе ядерных энергоресурсов // *Цветные металлы*. 2010. № 4. С. 89-95.
13. Шимкевич А., Прошкин А., Седов А. Перспективное плотное топливо для энергетиче-

ских реакторов // Росэнергоатом. 2011. № 10. С. 36-41.

14. Путилов А.В., Воробьев А.Г., Тимохин Д.В., Разоренов М.Ю. Использование метода «экономического креста» в расчетах потребности ядерного топлива для развития атомной энергетики // Цветные металлы. 2013. № 9. С. 18-26.

15. Путилов А.В., Воробьев А.Г., Тимохин Д.В., Разоренов М.Ю., Мякота Е.А. Методы совершенствования прогнозирования развития энергоснабжения месторождений полезных ископаемых // Цветные металлы. 2014. № 2. С. 11-18.

16. Ильина Н.А., Путилов А.В., Баранова И.А. Кадровое обеспечение управления знаниями в инновационной экономике // Инновации, 2016, № 10. С. 2-6.

17. Коптелов М.В. Гусева А.И. Особенности определения риска в инвестиционных проектах строительства АЭС // Атомная энергия, 2013. Т. 115, вып. 3. С. 170-176.

18. Иванов В.В. Инновационная парадигма XXI (2-е изд.). М.: Наука, 2015, 383 с.

19. Иванов В.В., Малинецкий Г.Г. Россия XXI век. Стратегия прорыва: технологии, образование, наука (2-е изд.). М.: Ленанд, 2017, 304 с.

Поступила в редакцию
27.04.2017 г.

V.V. Ivanov, A.V. Putilov¹

DIGITAL FUTURE: THE NEXT STEP IN THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER TECHNOLOGIES

The article appraises prospects for implementation of digital economy principles in the energy sector including nuclear power industry that shows the breadth and depth of new solutions for the entire energy ecosystem and indicates the necessity to focus on working with potential customers. The innovative economy implemented in the energy sector makes it possible to obtain new types of products and services, attracts and provides training of highly qualified professionals, and gives an opportunity to occupy an additional share of the world market.

Key words: digital economy, nuclear energy, innovation, information modeling, big data, energy efficiency.

² Vladimir V. Ivanov – Deputy President of the Russian Academy of Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics, PhD in Engineering, Professor of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), e-mail: Ivanov@presidium.ras.ru;

Alexander V. Putilov – Dean of Business Informatics and Complex System Management Department of the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Doctor of Engineering, Professor, e-mail: AVPutilov@mephi.ru

УДК 621.039 (470+571)

П.Н. Алексеев, А.Ю. Гагаринский, Ю.М. Семченков¹

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Для обеспечения успешной инвестиционной политики в ядерной энергетике (ЯЭ) и для создания условий принятия ее обществом необходимо стратегическое обоснование планов ее развития и твердое долгосрочное обязательство правительства следовать этим стратегическим планам. В рамках Международного проекта по инновационным реакторам и ядерному топливному циклу (ИНПРО) принято, что оптимизации всей ядерной энергосистемы будет благоприятствовать ситуация, когда составляющие ее установки, расположенные в разных странах, будут рассматриваться как часть международной многокомпонентной системы инновационной ядерной энергетике. В многокомпонентной системе ЯЭ основным принципом развития системы становится не конкуренция между различными типами реакторов, а их способность наилучшим образом реализовать свои потенциальные преимущества за счет системных возможностей компенсации их специфических слабых сторон. В статье изложены некоторые стратегические подходы к организации начального периода развития многокомпонентной структуры ЯЭ на примере двухкомпонентной системы ЯЭ в России, основанной на тепловых и быстрых реакторах.

Ключевые слова: система ядерной энергетике, реакторы на тепловых нейтронах, реакторы на быстрых нейтронах, замкнутый ядерный топливный цикл.

Введение

Сегодня основу ядерной энергетике в России и в мире составляют тепловые реакторы с водой под давлением. Учитывая темпы строительства новых АЭС, это положение сохранится долгие годы, поскольку срок эксплуатации таких реакторов уже продлевается до 60 (в перспективе – до 80 и более) лет. Поэтому при формировании долговременной стратегии развития ядерной энергетике рассматриваются различные сценарии перехода к замкнутому топливному циклу и включению быстрых реакторов в ее структуру с учетом неизбежности формирования двухкомпонентной системы, в которой одновременно будут работать как тепловые, так и быстрые реакторы [1-5]. В такой системе получаемый в быстром реакторе избыток нейтронов позволяет реализовать в них процесс расширенного воспроизводства ядерного топлива, посредством конверсии в делящиеся нуклиды сырьевых изотопов – урана-238 и/или тория-232. Тепловые реакторы берут на себя решение большей части системных энергетических задач. Они обеспечивают покрытие неравномерной нагрузки,

подстраивают мощностной ряд под внешние потребности, решают задачи неэлектрического энергопотребления.

Ядерно-энергетическая система с тепловыми реакторами далеко не исчерпала внутренних возможностей более эффективного использования топлива, например, при повышении термодинамической эффективности тепловых реакторов, изменении спектра нейтронов для компенсации изменения реактивности с выгоранием. Можно организовать в них замкнутый топливный цикл с использованием выделенного из облученного ядерного топлива (ОЯТ) плутония или топлива на основе неразделенного уран-плутониевого регенерата (РЕМИКС). К сожалению, в современных разработках быстрых реакторов по разным причинам существенно снижена или даже исключена способность избыточного воспроизводства нового топлива, но, если адаптировать характеристики этих реакторов под требования системы ЯЭ, то наработку искусственного ядерного топлива в них можно существенно увеличить.

Эти и другие мероприятия могут привести к заметному сокращению потребления природ-

¹ Павел Николаевич Алексеев – заместитель руководителя Курчатовского комплекса ядерных технологий, НИЦ «Курчатовский институт», к.ф.-м.н., e-mail: Alekseev_PN@nrcki.ru;

Андрей Юрьевич Гагаринский – советник директора НИЦ «Курчатовский институт», д.т.н., e-mail: Gagarinsky_AY@nrcki.ru;

Юрий Михайлович Семченков – руководитель Курчатовского комплекса ядерных технологий, НИЦ «Курчатовский институт», e-mail: Semchenkov_YM@nrcki.ru

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

ного топлива в водо-водяных энергетических реакторах (ВВЭР) с современных примерно 180 до 130 тU/год и ниже, что значительно увеличит эффективность ресурсной базы. А при достижении в перспективе доли БР в системе порядка 60%, потребление природного урана в системе можно будет практически прекратить.

Облегчить решение проблемы топливообеспечения при меньшей доле БР в системе и минимизировать проблемы обращения с плутонием и минорными актинидами можно за счет введения тория в систему ЯЭ как дополнительного ресурса. Исследования по перспективам использования тория в ядерной энергетике ведутся практически на протяжении всей истории мирного использования ядерной энергии (см., например, [6]). Это рассмотрение включает в себя применение тория в действующих реакторах, его использование в открытом и замкнутом топливном цикле, а также в системе тепловых и быстрых реакторов и в перспективных жидкосолевых реакторах. Существующее мнение о том, что практических шагов в масштабных разработках реакторов на ториевом топливе можно ожидать только после обострения проблемы исчерпания ресурсов дешевого урана отнюдь не отрицает целесообразности дальнейших работ по включению тория в систему ядерной энергетики России.

Многолетние исследования показали перспективность включения на дальнюю перспективу ресурсно-инновационной стратегии термоядерного источника нейтронов, предназначенного для обеспечения топливной базы крупномасштабной ядерной энергетике деления [7]. О возможности создания термоядерного реактора для наработки делящихся веществ писал еще И.В. Курчатов в 1951 г. [8].

Потенциал по производству топлива в термоядерных реакторах существенно выше, чем в любых других. Это связано с тем, что при одинаковой мощности в термоядерном реакторе производятся нейтроны, которые можно использовать для конверсии сырьевых изотопов в делящиеся, примерно на порядок больше чем в реакторах деления. При такой высокой интенсивности наработки нового делящегося материала доля термоядерных реакторов в системе должна быть на уровне примерно 10%.

Конечно, столь мощных термоядерных реакторов пока нет, однако уже реализуется международный проект ИТЭР, ориентированный на демонстрацию производства электроэнергии при помощи управляемого термоядерного синтеза. По сравнению с этой задачей создание гибридного термоядерного реактора для производства топлива для ядерной энергетики представляется более простым. Для гибридного термоядерного реактора, нарабатывающего топливо для реакторов деления, нет необходимости в высоком отношении полученной энергии к затраченной. Основная энергия будет получаться впоследствии из нового топлива в реакторах деления. Нет необходимости придерживаться очень жестких требований по непрерывности работы с коэффициентом нагрузки на уровне 0,8 и выше. Гибридный реактор может прерывать работу по мере собственных надобностей, поскольку произведенный им продукт отправляется на склад. Учитывая малую долю гибридных реакторов в системе, они могут быть приемлемы даже в случае существенно более высокой цены в сравнении с реакторами деления. Наконец, работа гибридного термоядерного реактора предполагается в режиме непрерывной очистки топливной композиции, в которой нарабатывается новый делящийся изотоп, в условиях максимально подавленного процесса деления ядер. Это гарантирует практически полное отсутствие остаточного энерговыделения в бланкете гибридного реактора, а, следовательно, и радиоактивности от продуктов деления. Предварительные оценки показывают, что для производства 1 грамма нового делящегося изотопа в гибридном реакторе будет высвобождаться радиоактивность примерно в 100 раз меньшая по сравнению с вариантом получения того же грамма делящегося изотопа после переработки ОЯТ быстрого реактора.

Разработка технологии производства топлива в гибридных термоядерных реакторах для использования его в реакторах деления расширяет возможности варьирования структуры ядерной энергетике, быстрые и тепловые реакторы в этом случае будут выступать как равноправные конкуренты, и их присутствие в энергетической системе будет обуславливаться их преимуществами в части безопасности и экономичности.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Ключевые задачи предстоящего этапа

Развитие ядерной энергетики должно происходить в рамках общей энергетической стратегии. Взгляды на стратегические ориентиры развития электрогенерации России в течение последних десяти лет корректировались в сторону снижения (с 2500 млрд кВт·ч/год в 2005 г. до 1500 млрд кВт·ч/год в 2015 г.). На сегодня (проектом Энергетической стратегии – 2035) в силу экономических причин предполагается, что страна энергоизбыточна и главной задачей является повышение энергоэффективности; при этом электрогенерация к 2030 г. увеличится в 1,2-1,3 раза (при среднем темпе роста экономики по инновационному сценарию около 4%). Такое развитие событий с точки зрения развития энергетики, как основы и базиса экономики, представляется маловероятным.

Исходя из состояния российской экономики, ориентироваться на высокие потребности в атомном энергопроизводстве не приходится, поскольку дешевый природный газ для энергетики будет доступен никак не менее чем до середины века. По этой причине альтернативные газу энергоисточники на этом временном интервале будут рассматриваться прежде всего для диверсификации энергетики, обеспечения энергобезопасности страны и в качестве задела на перспективу.

В этих условиях для ядерной энергетики, по видимому, следует исходить из роста ядерной генерации примерно до 40 ГВт к 2035 г. (вместо ~47 ГВт, планировавшихся дорожной картой «Росатома»), и практические меры по реализации стратегии рассматривать для такого энергетического сценария.

В стратегии развития ядерного сектора энергетики определяющее место приобретает его экспортная составляющая. Она опирается на приемлемость для рынка развиваемых в России и демонстрирующих референтность атомных станций при рыночной конкурентоспособности и общественно приемлемой безопасности, к тому же это сопровождается полным набором услуг ядерного топливного цикла.

В связи с возрастающей конкуренцией на реакторном рынке большое значение имеет созда-

ние нового продукта в достаточно сжатые сроки, определяемые ожидаемой динамикой рынка.

Таким образом, ключевыми задачами предстоящего этапа представляются:

- развитие проверенных реакторных технологий и обеспечение референтности их эволюционного развития;
- ориентация на возможность и востребованность экспорта проверенных реакторных технологий;
- целенаправленное создание на базе проверенных технологий нового продукта с меньшими удельными капитальными затратами в сроки, диктуемые рынком.

Наряду с этим необходимо продвижение в дополняющих и альтернативных технологиях (например, новое топливо и конструкционные материалы, ненатриевые брідеры, высокотемпературные реакторы, жидкосолевые реакторы, внедрение тория, альтернативные источники нейтронов).

Выводы

Результатом такого развития российской ядерной энергетики в перспективе станет практическое освоение основных технологий атомной отрасли и развитие ее как в плане решения собственных проблем, так и в плане готовности к использованию освоенных технологий, адекватных запросам рынка.

При этом центральной задачей для технологии ВВЭР следует считать создание в сжатые сроки нового продукта, пригодного для конкурентного положения на рынке. Эта стратегическая задача разбивается на конкретные цели и разработки:

- повышение потребительской привлекательности (надежность, безопасность, маневренность, когенерация электричества и тепла, отказ от борной кислоты в теплоносителе, гибкий топливный цикл) в рамках эволюции базового проекта;
- улучшение технико-экономических характеристик (уменьшение затрат на сооружение и эксплуатацию, сокращение удельной материало- и металлоемкости, повышение КПД энергоблока и др.);

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

- развитие отдельных технологий ВВЭР (парогенератор новой конструкции, повышение водородной безопасности, устойчивости к сейсмическим и ударным нагрузкам и др.);
- улучшение топливоиспользования (новые виды топлива, обеспечивающие понижение его температуры и повышение теплоустойчивости (жаропрочности) оболочек; повышение обогащения топлива для реализации двухгодичной кампании реактора; внедрение смешанного уран-плутониевого топлива, в перспективе – уран-ториевого топлива);
- расширение мощностного ряда, разработка проектов с гарантированным преимуществом на внутреннем и внешнем рынках: ВВЭР-1200, 1800; ВВЭР-600, 900; интегральный ВВЭР малой мощности; ВБЭР-300, 450, 600;
- разработка модификаций ВВЭР-супер (ВВЭР-С):
 - ВВЭР со спектральным регулированием изменения реактивности при выгорании топлива для эффективной работы в открытом и замкнутом топливном цикле;
 - ВВЭР-СКД с закритическими параметрами теплоносителя для работы в замкнутом топливном цикле с самообеспечением топливом.

В области технологии быстрых натриевых реакторов в число ключевых задач (расширение референтности) входят:

- развитие и совершенствование технологии БН на базе опыта БН-600 и БН-800, в том числе как источника нейтронов, например, для наработки урана-233 при помещении тория в экраны этих реакторов;
- выбор базового и перспективного топлива, конструкционных материалов и теплоносителей (в том числе с эвтектической модификацией натрия) для БН;
- определение системных технико-экономических требований к энергоблокам БН-1200 с учетом их жизненного цикла и границ конкурентоспособности технологии БН как части системы ЯЭ (как уже отмечалось, современные проекты быстрых

реакторов не ориентированы на снабжение тепловых реакторов топливом);

- оценка экспортного потенциала реакторной технологии БН-1200.

При любых геополитических или региональных изменениях отношение к ядерной энергетике с позиции социально-экономического доверия к ней будет по-прежнему базироваться на фактической оценке состояния радиационной безопасности, то есть способности организации всех этапов обращения с высокоактивными материалами таким образом, чтобы риск неконтролируемого выхода радиоактивности был минимизирован до приемлемого уровня. По этой причине работы, связанные с поиском материалов, конструкций и процессов, приносящих заметное снижение радиоактивного риска, в том числе и при тяжелых авариях на АЭС и предприятиях топливного цикла, будут привлекать внимание и инициировать потенциальную возможность практического внедрения.

Поэтому в области замыкания топливного цикла, переработки ОЯТ и изоляции РАО должны решаться следующие задачи:

- переработка накопленного ОЯТ и использование выделенного урана и плутония в реакторах ВВЭР и БН;
- производство топлива из регенерированных материалов;
- минимизация радиационной нагрузки на этапах регенерации, рефабрикации, транспортировки и загрузки топлива в реакторы, в том числе рассмотрение концепции гетерогенной топливной композиции для кардинального снижения радиационной нагрузки при переработке ОЯТ на первом этапе развития замкнутого ядерного топливного цикла;
- комплексная постановка экономических проблем ядерного топливного цикла на уровне микро-, макро- и институциональных моделей экономики;
- разработка методики и выполнение исследований для определения оптимальной глубины выгорания для ОЯТ ВВЭР и БН в открытом и замкнутом ЯТЦ.

В направлении развития дополняющих и альтернативных технологий должны быть опре-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

делены потребности в НИОКР, возможные этапы и сроки подтверждения технологий и их коммерциализации. Развитие любой из новых технологий должно учитывать возможность и перспективность использования соответствующих разработок на внешнем рынке и возможности международного сотрудничества для их поддержки.

Предстоящий период экономического развития России не требует быстрого роста производ-

ства энергии. Сейчас идет этап совершенствования реакторных технологий, составляющих основу ядерного сектора энергетики России и объединение их для создания единой системы ядерной энергетики, отвечающей принципам устойчивого развития, сформулированным в рамках Международного проекта по инновационным реакторам и ядерному топливному циклу (ИНПРО), разрабатываемого под эгидой МАГАТЭ [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев П.Н., Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю. и др. О стратегии развития ядерной энергетики России до 2050 г. / *Атомная энергия*, т. 111, вып. 4, октябрь 2011.
2. О стратегии ядерной энергетики России до 2050 года. НИЦ «Курчатовский институт», М., 2012.
3. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В. и др. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. / *Атомная энергия*, т. 112, вып. 6, июнь 2012.
4. Сидоренко В.А., Алексеев П.Н., Асмолов В.Г. и др. Ключевые положения ядерной энергетики России до 2050 года и далее. XXI Александровские чтения, 13 февраля 2015 г., НИЦ «Курчатовский институт», М., 2015.
5. Андрианова Е.А., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Перспективные топливные загрузки реакторов для замкнутого топливного цикла / *Атомная энергия*, т. 118, вып.5, май 2015.
6. *Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle*. NEA, No 7224, OECD 2015.
7. Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Азизов Э.А. и др. Термоядерный источник нейтронов для производства ядерного топлива / *Атомная энергия*, т. 114, вып. 3, март 2013.
8. Курчатов И.В., Головин И.Н. О возможности создания магнитных термоядерных реакторов. В кн. И.В. Курчатов. Собрание научных трудов, т. 5. М: Наука, 2012, с. 78-81.
9. *Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles. Report of Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO)*, IAEA-TECDOC-1434, December 2004.

Поступила в редакцию
22.05.2017 г.

P.N. Alekseev, A.Yu. Gagarinsky, Yu.M. Semchenkov²

STRATEGY FOR DEVELOPMENT OF TWO-COMPONENT NUCLEAR POWER INDUSTRY

In order to ensure a successful nuclear power industry investment policy and to lay the groundwork for its adoption by society, it is necessary to strategically substantiate its development plans and obtain a binding long-term government commitment to follow these strategic plans. Under the International Project on Innovative Reactors and Nuclear Fuel Cycle (INPRO) it is accepted that optimization of the entire nuclear power system will benefit from the situation when its constituent plants located in different countries will be considered as part of the international multicomponent system of innovative nuclear power industry (INPRO). The main principle of the system development in a multicomponent nuclear power industry system is not a competition between different types of reactors, but their capability to realize their potential advantages in the best possible way through system capabilities to compensate for their specific weaknesses. The article outlines some strategic approaches to organization of the initial period of the multicomponent nuclear power industry structure development by the example of the Russian two-component nuclear power industry system based on thermal and fast reactors.

Key words: nuclear power industry system, thermal neutron reactors, fast neutron reactors, closed nuclear fuel cycle.

² Pavel N. Alekseev – Deputy Head of the Kurchatov Nuclear Technology Complex, Research Center «Kurchatov Institute», PhD in Physical and Mathematical Sciences, e-mail: Alekseev_PN@nrcki.ru;

Andrey Y. Gagarinsky – Adviser to the Director of the Research Center «Kurchatov Institute», Doctor of Engineering, e-mail: Gagarinsky_AY@nrcki.ru;

Yuri M. Semchenkov – Head of the Kurchatov Nuclear Technology Complex, Research Center «Kurchatov Institute», e-mail: Semchenkov_YM@nrcki.ru

УДК 621.039 (470+571)

Е.В. Муравьев¹

КОНЦЕПЦИЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ В РАМКАХ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ

Проведено системное исследование с целью определения экономически оптимального сценария реализации новой технологической платформы ЯЭ на базе разработок проекта «Прорыв» с учетом взаимодействия топливных циклов тепловых и быстрых реакторов при переходе к разворачиванию крупномасштабной ЯЭ естественной безопасности. Сформулированы рекомендации по выбору экономически оптимальных решений по внедрению технологий проекта «Прорыв».

Ключевые слова: развитие ядерной энергетики, системное моделирование, замыкание ЯТЦ, быстрые реакторы, ОЯТ, переработка ОЯТ, топливо быстрых реакторов.

Введение

В 1990-х годах специалистами российских отраслевых и академических институтов было положено начало разработки долгосрочной стратегии развития ядерной энергетики (ЯЭ) в новой России на базе физических предпосылок обеспечения безопасности АЭС, стремления к удешевлению их строительства, сохранения природного баланса радиоактивности при захоронении отходов, предотвращения распространения оружейных материалов и полного вовлечения в энергопроизводство урановых запасов. Эта работа нашла отражение в одобренной Правительством РФ в 2000 г. «Стратегии развития атомной энергетики России в первой половине XXI века» [1]. С утверждением ФЦП ЯЭНП, в 2011 г. была определена приоритетная задача отрасли – реализация проекта «Прорыв», объединяющего проекты по формированию технологий ЯЭ естественной безопасности на основе быстрых реакторов (БР) и замкнутого ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Дальнейшее развитие стратегического подхода получило в ряде публикаций, в том числе в недавней работе [2]. Принципиальные решения по реализации этого подхода сводятся к следующему.

- Ввод самодостаточных БР, использующих для подпитки практически неограниченные ресурсы отвалного урана, с коэффициентом воспроизводства активной зоны (КВА) на уровне 1, в которых физика активной зоны ориентирована на достиже-

ние естественной безопасности, прежде всего благодаря работе на равновесном плотном нитридном топливе с минимальным запасом реактивности, предотвращающим реактивностные аварии.

- Отказ от теплоносителей на основе перегретой воды, пара или газа под высоким давлением, потенциально способных мобилизовать радиоактивность, накопленную в активной зоне, переход на инертный высококипящий свинцовый теплоноситель.
- Отказ от химически активных материалов (графит, цирконий, натрий), связанных с опасностью пожаров и взрывов при взаимодействии с воздухом и водой (сохраняя возможность ограниченного использования реакторов БН на промежуточном этапе отработки технологий замкнутого ЯТЦ).
- Замыкание ЯТЦ БР и ЯЭ в целом с утилизацией в БР энергетически ценных продуктов переработки всех видов облученного ядерного топлива (ОЯТ), с трансмутацией долгоживущих актинидов, без разделения U и Pu, отказ от наработки Pu оружейного качества в бланкете БР (при экспорте в неядерные страны).
- Реализация (при технико-экономической целесообразности) пристанционный ЯТЦ в составе промышленных энергокомплексов (ПЭК) с несколькими блоками БР, коротким временем выдержки ОЯТ, мини-

¹ Евгений Владиславович Муравьев – начальник отдела Инновационно-технологического центра проекта «Прорыв» ГК «Росатом», д.т.н., e-mail: meb@progvv2020.ru

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

мальным накоплением ядерных материалов (ЯМ), без дальней транспортировки ОЯТ и ЯМ.

- Экономически оправданная постепенная замена традиционных ВВЭР на БР естественной безопасности, отказ в конечном итоге от технологии обогащения урана.

Постановка исследования

В данной статье представлены результаты системных исследований, которые конкретизируют возможные пути перехода от сегодняшней ЯЭ на тепловых реакторах (ТР) с открытым ЯТЦ к ЯЭ на новой технологической платформе (НТП) с доминированием БР естественной безопасности и замкнутым ЯТЦ, начиная с реализации проекта «Прорыв». Путь к новой ЯЭ лежит через этап двухкомпонентной ее структуры, когда действующие в традиционном открытом ЯТЦ ТР будут сосуществовать с вводимыми БР, предназначенными для работы в замкнутом ЯТЦ.

Негативный в плане экономики мировой опыт сооружения и эксплуатации первого поколения БР с натриевым теплоносителем породил концепцию их использования в качестве наработчиков плутония для топлива ТР (в перспективе истощения ресурсов дешевого урана). В дополнение, или вместо этого, рассматривалось дожигание в БР долгоживущих актинидов из ОЯТ ТР. То есть в структуре ЯЭ БР отводилась роль перманентного вспомогательного звена, «услуги» которого могли бы оправдывать повышенные капитальные вложения в БР.

В противоположность этому, российская концепция Стратегии-2000, ориентированная на ввод БР естественной безопасности, экономически более привлекательных, чем традиционные ВВЭР, рассматривает двухкомпонентную ЯЭ лишь как промежуточный, преходящий этап развития новой технологической платформы ЯЭ с доминированием БР.

Эволюция двухкомпонентной ЯЭ будет включать, очевидно, три периода:

1) становления подсистемы БР и замыкания их ЯТЦ в рамках существующей ЯЭ с продолжением развития подсистемы ТР до прекращения их ввода;

2) параллельного функционирования подсистем ТР и БР с вводом новых мощностей только на БР;

3) окончательного становления ЯЭ на НТП с выводом из эксплуатации ТР (за исключением ограниченного парка РУ для решения каких-либо специфических задач).

Суммарная продолжительность указанных трех периодов соизмерима с продолжительностью жизненного цикла ТР и может составить десятки, если не сотни лет. В длительной перспективе эту продолжительность желательно минимизировать в целях:

- экономии ресурсов урана;
- сохранения приемлемого уровня безопасности ЯЭ в целом с ростом мощностей АЭС;
- решения проблемы накапливаемого ОЯТ ТР;
- снижения (в конечном итоге и в рамках ЯЭ) общесистемной стоимости электроэнергии.

Реализация потенциальной возможности создания крупномасштабной ЯЭ связана с необходимостью подтверждения ее экономической привлекательности. Экономическая привлекательность может оцениваться с различных точек зрения:

- с позиции индивидуальных инвесторов или корпораций в отношении наиболее доходного проекта масштаба отдельно взятой АЭС; такой подход при исследовании долгосрочных сценариев развития ЯЭ означает, по существу, игнорирование затрат и доходов за горизонтом ~20 лет, что заведомо не годится для перспективных государственных программ;
- применительно к решению задач удовлетворения долгосрочных энергетических потребностей и обеспечения в перспективе лидирующего положения страны на мировом рынке энерготехнологий.

В качестве показателя экономической эффективности, помимо традиционного тарифа безубыточности (Levelized Cost Of Electricity – LCOE), должен рассматриваться аналогичный показатель для генерирующей системы в целом (System LCOE – SLCOE), рассчитываемый на

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

базе интервала времени, необходимого для ее перестройки и выхода на установившийся режим функционирования.

Исходные данные

Исходные данные для расчета технико-экономических показателей рассматриваемой системы ЯЭ получены в части БР по материалам разработок проекта «Прорыв» 2014-15 гг. [3] и в части ВВЭР – из публикаций [4, 5]. Для головной части ЯТЦ (исходная стоимость природного урана и стоимость работы разделения) использованы данные [6]. Характеристики потребления топлива рассматриваемыми реакторами определялись исходя из известных данных по их тепловой мощности с учетом эволюционного изменения средней глубины выгорания, задаваемой для ВВЭР от 40 до ~60 ГВт. сут./т к 2030 г. и

для БР от 62 до 114 ГВт. сут./т к 2050 году. Сводка использованных данных по АЭС с ТР и БР представлена в табл. 1, по переделам ЯТЦ – в табл. 2 (все в ценах 2014 г.).

Сценарии развития ЯЭ

Для исследования возможной динамики развития российской ЯЭ с переходом на НТП рассмотрен ряд сценариев в рамках вероятного, по данным ИНЭИ [7], масштаба развития ЯЭ в целом до 2050 г., проэкстраполированного до конца века с выходом на уровень 70 ГВт, а также при более агрессивном оптимистическом варианте с достижением к концу века ~120 ГВт. Результаты исследования по каждому сценарию включают динамику изменения структуры потребления и производства ядерного топлива, баланса продуктов переработки ОЯТ ТР и БР,

Таблица 1

Технико-экономические показатели АЭС с ВВЭР и ПЭК с БР

Удельные капитальные вложения	Единицы изм.	Стоимость
ВВЭР-ТОИ	долл./кВт(э)	2800
ПЭК с БР-1200		2300
Срок службы		
РУ ВВЭР-ТОИ, РУ БР-1200	лет	60
Удельные агрегированные эксплуатационные затраты (без топливных)		
АЭС с ВВЭР-ТОИ		
ПЭК с БР-1200	долл./кВт (уст. э)	62
		61
Стартовая загрузка		
РУ ВВЭР-ТОИ (УОХ, МОКС)		
РУ БР-1200 (СНУП)	т ТМ	77,0 61,0
Выгорание		
РУ ВВЭР (ВВЭР-1000 – ВВЭР-ТОИ)		
РУ БР-1200	ГВт.сут/т ТМ	40-60 62-115
Кампания (число перегрузок)		
РУ ВВЭР (ВВЭР-1000 – ВВЭР-ТОИ)		
РУ БР-1200	Эфф. суток	1200-1350 (3) 1320-2640 (4-8)
Мощность годовой подпитки топливом (при КИУМ = 1)		
РУ ВВЭР (ВВЭР-1000 – ВВЭР-ТОИ)		
РУ БР-1200	т/год	27,4-20,6 16,5-8,9

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Таблица 2

Технико-экономические показатели ЯТЦ (цены 2014 года)

Пристанционный ЯТЦ в составе ПЭК с БР	Единицы изм.	Стоимость
Удельные капитальные вложения	млн долл./ (т ТМ/год)	~40
Переработка ОЯТ БР + рефабрикация СНУП топлива	млн долл./т ТМ	~6
Хранение ВАО от ОЯТ с выгоранием 7-12%	млн долл./т ИТМ	0,058-0,107
Захоронение ВАО от ОЯТ с выгоранием 7-12%	млн долл./т ИТМ	0,218-0,403
Централизованный ЯТЦ БР		
Удельные КВЛ, завод изготовления свежего СНУП-топлива, 100 т/год	млн долл./ (т ТМ/год)	14,8
Фабрикация свежего СНУП-топлива, 100 т/год	млн долл./т ТМ	2,5
Фабрикация свежего UN-топлива БР на действующем заводе масштаба, 1000 т/год	млн долл./т ТМ	0,39
Централизованный ЯТЦ ВВЭР		
Исходная стоимость природного урана	долл./кг	100
Стоимость работы разделения, природный уран регенерат из ОЯТ ТР	долл./ЕРР	110 132
Удельные КВЛ, завод изготовления свежего UOX-топлива, 1000 т/год	млн долл./ (т ТМ/год)	1,68
Удельные КВЛ, завод переработки ОЯТ ВВЭР, 1000 т/год	млн долл./ (т ТМ/год)	1,91
Фабрикация свежего UOX-топлива ВВЭР, 1000 т/год	млн долл./т ТМ	0,32
Переработка ОЯТ ВВЭР, 1000 т/год	млн долл./т	0,24
Удельные КВЛ в хранилища ОЯТ: мокрое 6000 т сухое 9000 т	млн долл./т емкости	0,060 0,044
Хранение ОЯТ во внестанционных хранилищах	млн долл./ (т ИТМ/год)	0,26 (0,008)

потребления природного урана и объемов работы разделения, а также стоимостных показателей, определяющих топливную составляющую и себестоимость вырабатываемой электроэнергии.

Результаты исследования

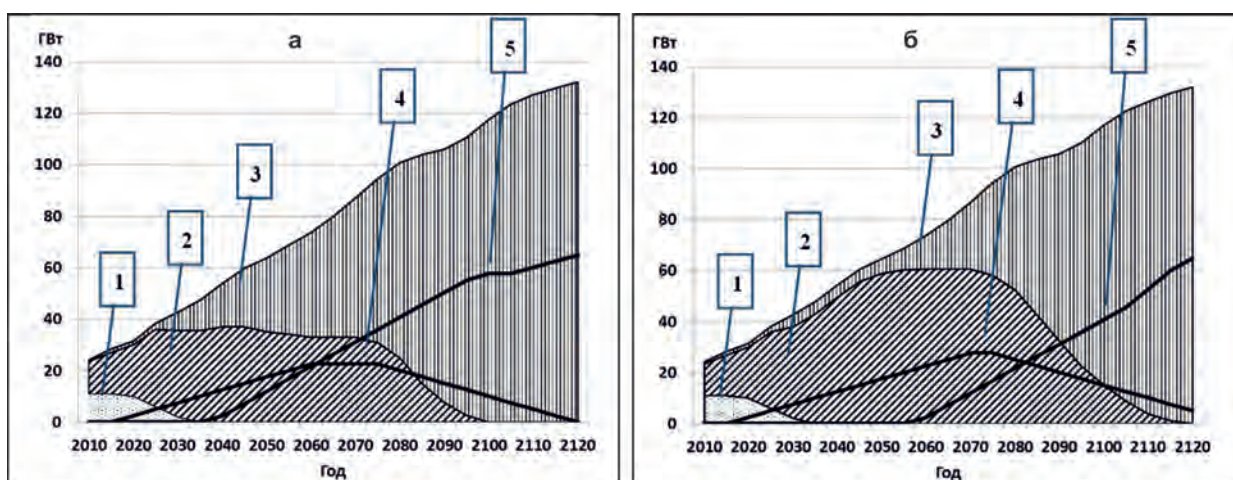
Структура генерирующих мощностей АЭС формируется по-разному в зависимости от двух ключевых факторов: общего масштаба развития и времени прекращения ввода ВВЭР, как показано на рис. 1 и 2. Отчетливо иллюстрируется

результат продления вводов ВВЭР в затягивании перехода ЯЭ на НТП через этап двухкомпонентности, что проявляется в неблагоприятном изменении ряда ключевых показателей, рассматриваемых ниже.

Топливный баланс рассматриваемой развивающейся двухкомпонентной системы ЯЭ с замыканием ЯТЦ определяется следующими основными факторами (в соответствии с динамикой изменения действующих мощностей):

- потреблением свежего UOX-топлива ТР на основе обогащенного урана для пуска

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

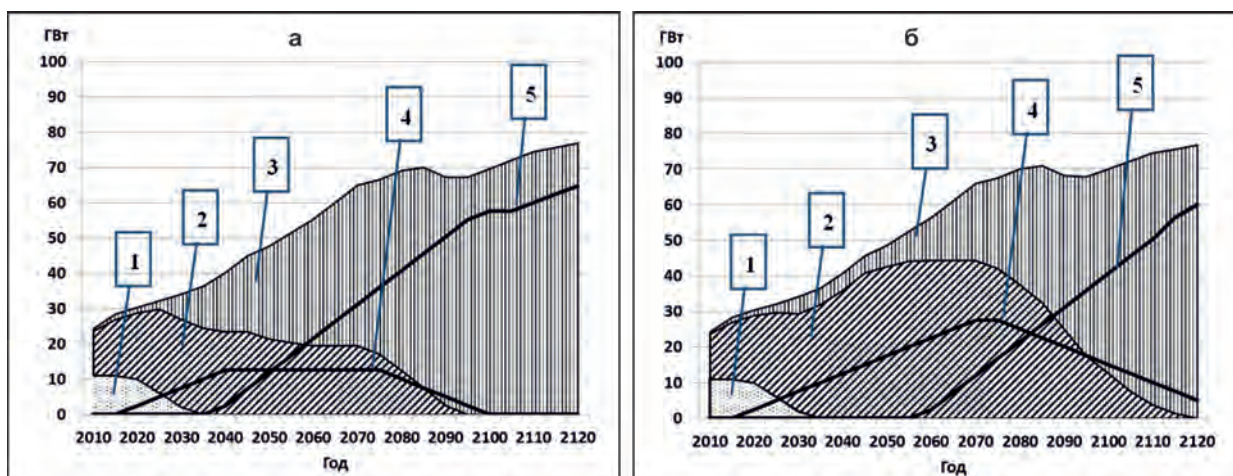


а) ввод ВВЭР до 2040 г.;

б) ввод ВВЭР до 2060 г.;

1 – РБМК; 2 – ВВЭР; 3 – БР; 4 – ВВЭР за рубежом; 5 – БР за рубежом

Рис. 1. Установленные мощности АЭС (оптимистичный масштаб развития)



а) ввод ВВЭР до 2035 г.;

б) ввод ВВЭР до 2060 г.;

1 – РБМК; 2 – ВВЭР; 3 – БР; 4 – ВВЭР за рубежом; 5 – БР за рубежом

Рис. 2. Установленные мощности АЭС (вероятный масштаб развития)

- новыми блоками и дальнейшей постоянной подпитки в последующих перегрузках;
- потреблением свежего UN-топлива БР на основе обогащенного урана для пуска новых блоков и их начальной подпитки до замыкания собственного ЯТЦ;
- использованием продуктов переработки ОЯТ ТР для получения плутоний-содержащего стартового топлива БР (смешанное нитридное уран-плутониевое – СНУП-топливо из «стороннего» плутония);

- использованием плутония из ОЯТ ВВЭР с получением МОКС (смешанного оксидного) топлива для добавления к основному УОХ-топливу ВВЭР с частичным замыканием их собственного ЯТЦ (без дальнейшего рециклирования в ВВЭР);
- использованием (при замыкании собственного ЯТЦ) регенерированного СНУП-топлива БР с коэффициентом воспроизводства ~1,05 при неограниченном рециклировании;

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

- использованием регенерата урана из ОЯТ ТР (приоритетно наряду с отвальным ураном) в качестве сырьевой добавки при изготовлении СНУП-топлива БР, а также для дообогащения при производстве уранового топлива БР и ВВЭР.

Переработка ОЯТ ТР. Влияние перечисленных факторов зависит, помимо роста генерирующих мощностей, от выбора времени начала массовой переработки накопленного ОЯТ ТР с ожидаемым вводом завода РТ-2 (вместо либо в дополнение к действующему РТ-1 с относительно небольшой мощностью ~100 т/год). В качестве примера на рис. 3 представлены данные, относящиеся, в рамках оптимистического масштаба развития, к накоплению и переработке ОЯТ ВВЭР при наиболее раннем (2030 г.) и наиболее позднем (2060 г.) сроке ввода РТ-2. Переработка ОЯТ РБМК, имеющего пониженную по сравнению с ВВЭР концентрацию плутония (~0,5%), рассматривается как дополнительная опция с возможной реализацией во второй половине века.

Сдвиг срока ввода РТ-2 (первая очередь мощностью 800 т/год) на 30 лет приводит к увеличению максимума накопления ОЯТ ВВЭР (с учетом возврата от экспортированных АЭС) в три раза – с 10 до 30 тыс. т, что потребует в районе 2040 г. ввода дополнительного хранилища, равного по объему существующему в 15000 т, а также увеличения во второй половине века ско-

рости переработки. При этом окончание утилизации накопленного ОЯТ отодвигается на 15 лет. Однако перечисленные негативные последствия следует оценивать в совокупности с положительными эффектами, которые обсуждаются ниже.

Динамика и структура топливопотребления ЯЭ в целом при замыкании ЯТЦ зависят как от выхода продуктов переработки накопленного ОЯТ ТР, так и от изменения структуры генерирующих мощностей АЭС. Влияние последнего фактора иллюстрируется рис. 4, где показаны полный объем топливопотребления АЭС России с его составляющими, а также поставки топлива для экспортируемых АЭС (но без учета регенерированного топлива экспортированных БР, производимого в пристанционном ЯТЦ).

Сразу следует обратить внимание, что общий объем топливопотребления к концу века оказывается примерно равным современному, хотя суммарная мощность АЭС в приведенном примере оптимистического масштаба развития возрастает в 4 раза (см. рис. 1). Это объясняется отчасти предполагаемым замедлением темпов наращивания мощностей АЭС (с соответствующим уменьшением затрат топлива на первые загрузки вводимых блоков) по завершении развертывания крупномасштабной ЯЭ, но главным фактором здесь является переход ЯЭ на НТП с доминированием БР, которые потребляют меньше топлива благодаря повышенной сред-

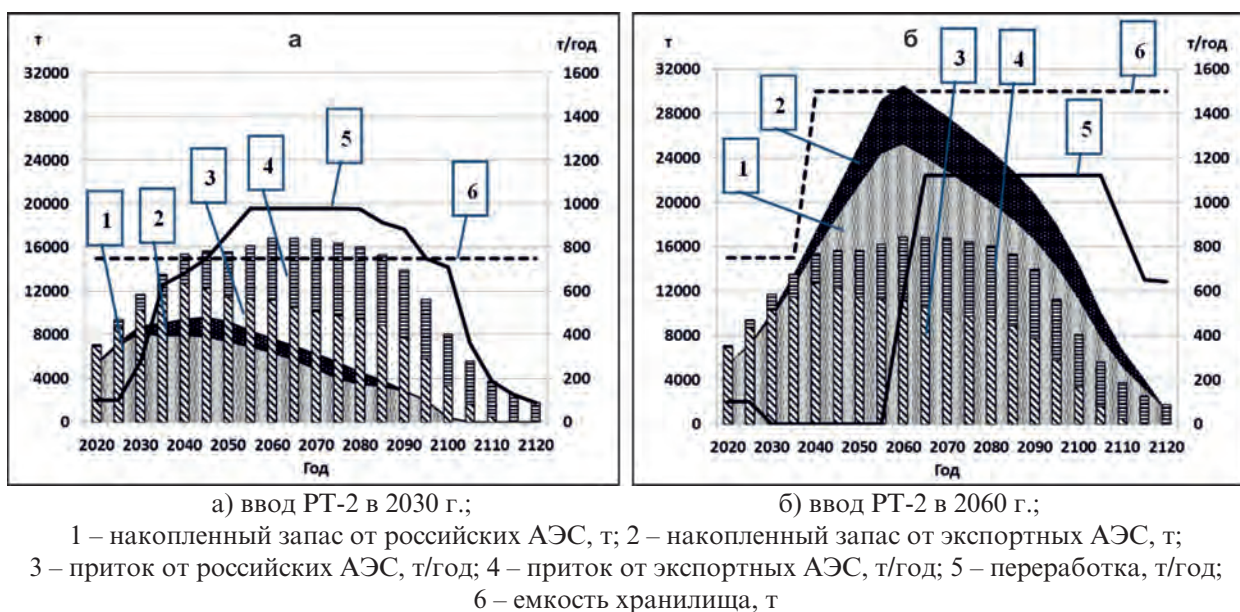
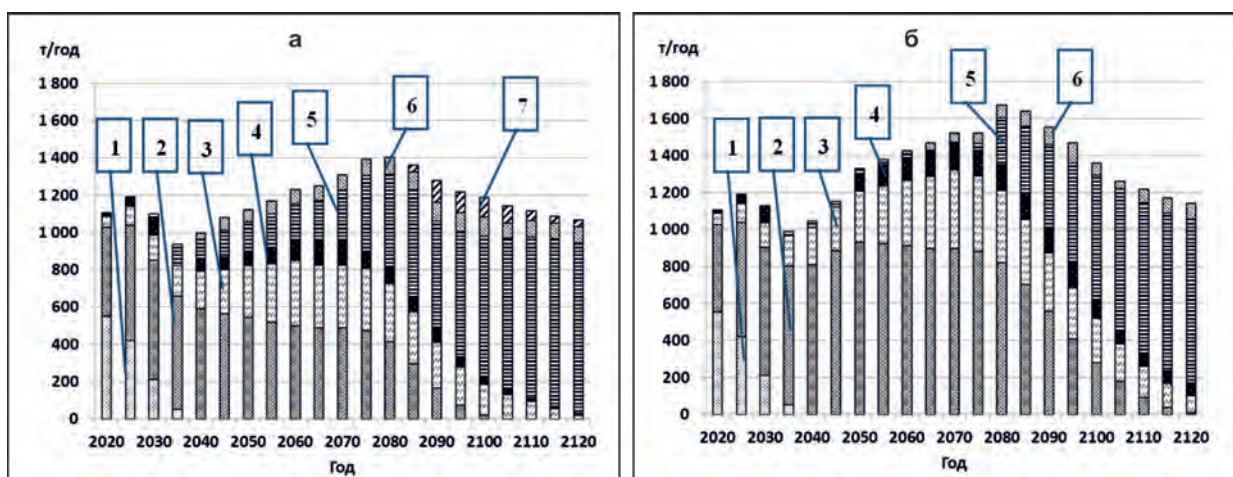


Рис. 3. Накопление и переработка ОЯТ ВВЭР (оптимистичный масштаб развития)

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ



а) ввод ВВЭР до 2040 г.; б) ввод ВВЭР до 2060 г.;
1 – УОХ-топливо РБМК; 2 – УОХ-топливо ВВЭР в России; 3 – УОХ-топливо ВВЭР на экспорт;
4 – СНУП-топливо БР из «стороннего» плутония в России; 5 – регенерированное СНУП-топливо БР в России; 6 – UN-топливо БР на экспорт; 7 – UN-топливо БР в России

Рис. 4. Потребление топлива АЭС (оптимистичный масштаб развития)

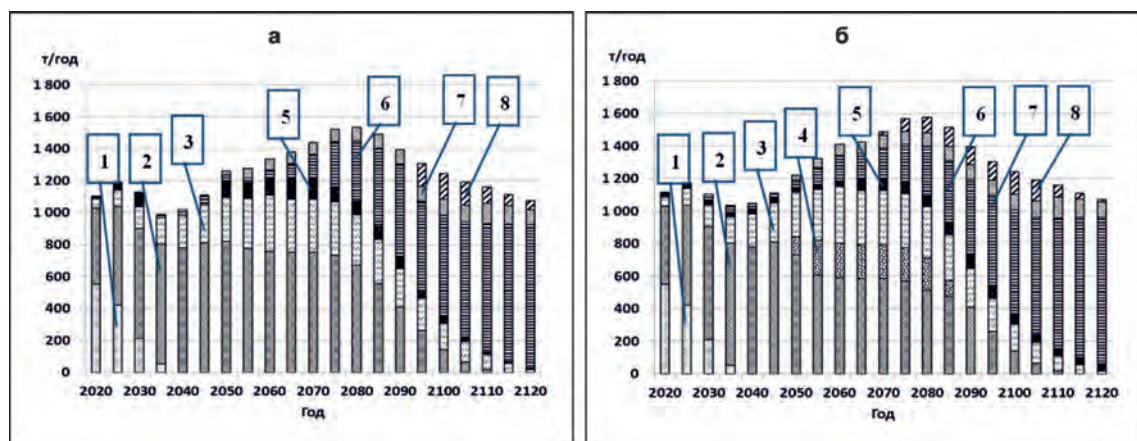
ней глубине выгорания (до 12% против ~6% для ВВЭР), а с учетом экспорта топлива дают также значительную экономию его поставок для БР за рубежом, которые при замыкании их ЯТЦ становятся самодостаточными (требуют подпитки только из практически неограниченных ресурсов отвалного урана). Эффект от структурной перестройки ЯЭ при продлении ввода ВВЭР (рис. 4б) снижается, а общий уровень топливopотребления возрастает (ср. с рис. 4а). При этом увеличенная доля ВВЭР в структуре генерирующих мощностей обуславливает производство большего количества ОЯТ (содержащего ~1% плутония), переработка которого увеличивает топливный ресурс «стороннего» плутония для БР. Это видно из рис. 4б, где урановое топливо БР идет только на экспорт, поскольку необходимость его использования на российских АЭС не возникает. Но следует отметить, что экономически для системы в целом такой ресурс мало эффективен: для получения 1 т топлива БР, содержащего 13-15% плутония, необходимо переработать до 15 т ОЯТ ВВЭР, тогда как переработка ~1 т собственного ОЯТ равновесного топлива БР с заменой удаляемых продуктов деления сырьевой подпиткой в виде отвалного или регенерированного (из ОЯТ ВВЭР) урана тоже дает 1 т регенерированного топлива БР.

Опция МОКС-топлива. Наряду с продлением ввода ВВЭР рассмотрен также сценарий с расширением их топливного ресурса в соответствии с известной концепцией использования МОКС-топлива, обсуждаемой, например, в недавно опубликованной книге [6].

Следуя указанному источнику, в этом сценарии имеющиеся запасы плутония направляются на изготовление МОКС-топлива ВВЭР, «вторичный» плутоний из МОКС ОЯТ (непригодный для рециклирования в ВВЭР) передается на производство топлива БР, а «улучшенный» плутоний из ОЯТ БР используется для нового МОКС-топлива ВВЭР. Сравнительная динамика и структура топливopотребления в сценариях без и с использованием МОКС-топлива ВВЭР показаны на рис. 5.

При использовании МОКС-топлива потребление топлива ВВЭР несколько возрастает из-за ограничения глубины выгорания, связанного с деградацией изотопного состава при рециклировании (принято 50 ГВт.сут/т против 60 ГВт.сут/т для УОХ). Для БР переход на использование плутония из ОЯТ МОКС ВВЭР вместо ОЯТ УОХ сокращает ресурс плутония из-за ухудшения его качества после облучения в ВВЭР – концентрация плутония в первой загрузке требуется на 22% больше [8]. Компенса-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ



а) без МОКС-топлива;

б) с МОКС-топливом;

1 – УОХ-топливо РБМК; 2 – УОХ-топливо ВВЭР в России; 3 – УОХ-топливо ВВЭР на экспорт;
4 – МОКС-топливо ВВЭР в России; 5 – СНУП-топливо БР из «стороннего» плутония в России;
6 – регенерированное СНУП-топливо БР в России; 7 – UN-топливо БР на экспорт;
8 – UN-топливо БР в России

**Рис. 5. Потребление топлива АЭС без и с МОКС-топливом ВВЭР
(оптимистичный масштаб развития, ввод ВВЭР до 2050 г.)**

ция этого эффекта достигается увеличением потребления замыкающего уранового топлива (ср. рис. 5а и 5б), что сказывается на общем балансе потребления природного урана. Таким образом, известная точка зрения насчет экономии урана при использовании МОКС-топлива ВВЭР имеет смысл лишь в рамках однокомпонентной ЯЭ на ТР, тогда как в переходном процессе на НТП с БР эта опция дает очевидный негативный эффект. Здесь стоит заметить, что это утверждение справедливо и в отношении концепции экономии урана с использованием РЕМИКС-топлива ВВЭР, которое в данном исследовании непосредственно не рассматривалось. Суть решения, как следует из приведенных примеров, состоит в том, что все имеющиеся топливные ресурсы выгоднее использовать в БР нежели в ТР. Это положение наглядно демонстрируется при сравнении ключевых интегральных показателей всех рассмотренных сценариев.

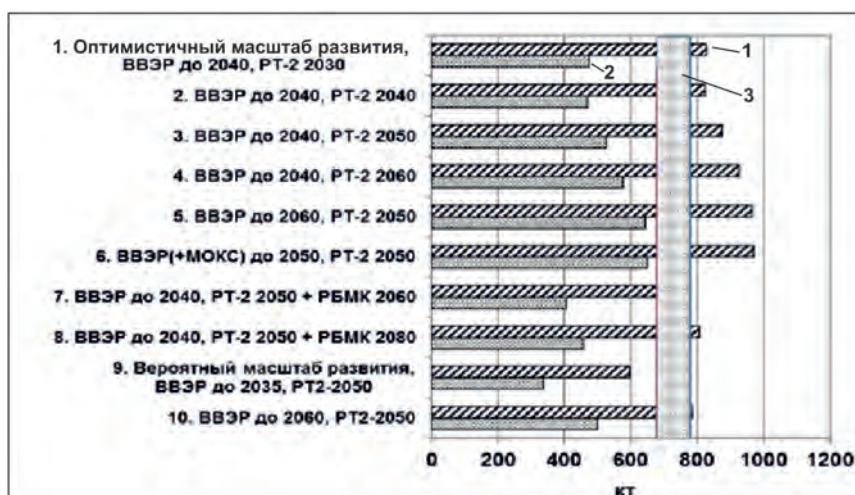
Интегральное потребление урана. По внутреннему потреблению урана в России (рис. 6) наименее экономными, с интегральным потреблением 630-650 кт, оказываются сценарии с продлением ввода ВВЭР до 2050-60 гг. и с использованием МОКС-топлива. Прекращение ввода ВВЭР после 2040 г. и пуск РТ-2 в это же время с отказом от использования МОКС-топлива ВВЭР (сценарий 2) позволяют снизить интегральное потребление до 470 кт.

Наибольшую экономию потребления урана в рамках оптимистичного масштаба развития обеспечивает сценарий 7 с предполагаемым вводом в 2060 г. переработки ОЯТ РБМК (через 10 лет после пуска РТ-2 для переработки ОЯТ ВВЭР), интеграл потребления снижается до 400 кт. Механизм экономии (при неизменном потреблении урана в ВВЭР) состоит в том, что переработка ОЯТ РБМК дает дополнительный ресурс плутония для топлива БР, которые во второй половине века используют некоторое количество замыкающего уранового топлива. Сокращение этого потребления и дает экономию. Если переработку ОЯТ РБМК сдвинуть на более поздний срок – 2080 г., как в сценарии 8, то экономия будет меньше, интеграл потребления возрастает до 460 кт.

При вероятном масштабе развития ЯЭ с разумно ранним прекращением ввода ВВЭР (сценарий 9) запасы урана сберегаются наиболее эффективно. Однако продление ввода ВВЭР до 2060 г. (сценарий 10) приводит к существенным потерям национального энергоресурса – интеграл потребления возрастает до 500 кт, что хуже указанного выше для сценария 2, то есть ЯЭ масштаба 70 ГВт с помощью ВВЭР к концу века может «съесть» урана больше, чем ЯЭ масштаба 120 ГВт.

Интегральное внутреннее потребление урана в России по мере перехода ЯЭ на НТП прибли-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ



1 – интегральное потребление с учетом экспорта ядерного топлива;
2 – в том числе для России; 3 – ограничение по национальным запасам (включая зарубежные активы)

Рис. 6. Интегральное потребление урана до конца века

жается в конце века к насыщению, тем самым успешно решается проблема ресурсов для национальной ЯЭ. Однако в то же время потребность в уране с учетом предполагаемого экспорта топлива ВВЭР и БР, показанная на рис. 6, выходит за пределы национальных запасов, достигая 800 кт, а в ряде сценариев приближаясь к 1 млн т, и продолжает расти. Это требует, очевидно, особого рассмотрения в плане политики использования национальных ресурсов.

Интегральные затраты. На рис. 7 представлено сравнение различных сценариев по интегральным затратам на развитие системы ЯЭ до конца века, отнесенным к достигаемой в каж-

дом сценарии мощности генерации на НТП, что отражает суть целевого назначения этих затрат.

Из этого рисунка видна прежде всего неэффективность продления ввода ВВЭР как при оптимистичном масштабе развития ЯЭ (сценарий 5), так и особенно при вероятном (сценарий 10). Неэффективен и сценарий 6 с внедрением МОКС-топлива ВВЭР. С другой стороны, реализация во второй половине века переработки накопленного ОЯТ РБМК (сценарии 7, 8) может способствовать (благодаря экономии урана, см. рис. 6) некоторому снижению относительных затрат на развитие НТП.

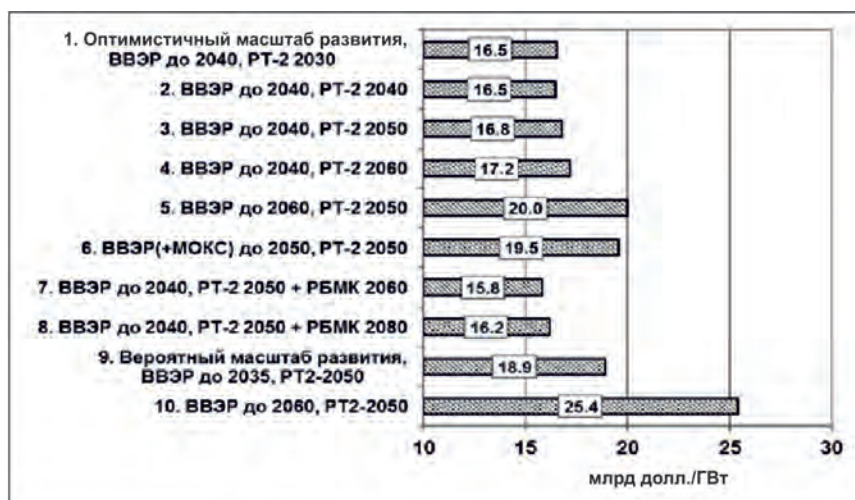


Рис. 7. Относительные затраты на НТП ЯЭ России

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

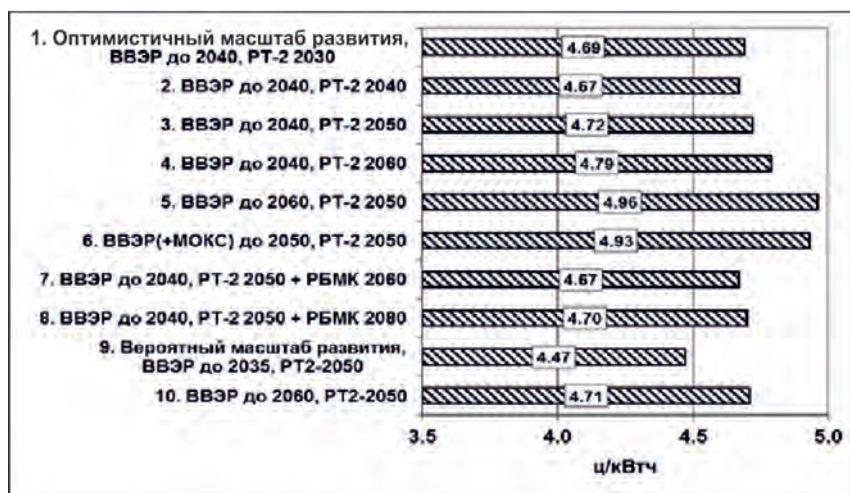


Рис. 8. Общесистемный тариф безубыточности (SLCOE)

В целом с точки зрения эффективности затрат очевидна предпочтительность оптимистичного масштаба развития.

Общесистемный тариф безубыточности

Общесистемный тариф безубыточности (SLCOE – рис. 8) в данном исследовании, при заданном одинаковом для всех сценариев росте генерирующих мощностей (в рамках каждого из двух предполагаемых масштабов развития), является одновременно и формой выражения приведенных затрат на развитие системы ЯЭ.

По критерию достижения минимальной SLCOE сценарии 5 и 6 с продлением ввода ВВЭР и использованием в них МОКС-топлива выглядят наихудшим образом. В отношении срока пуска завода РТ-2 для массовой переработки ОЯТ ВВЭР можно отметить, что выбор 2030 г. по сценарию 1 (или даже более раннего срока в районе 2025 г., как предполагается в [6]) не является необходимым, минимум SLCOE приходится на 2040 г. (сценарий 2).

Следует указать также, что снижение SLCOE в сценариях 9 и 10, относящихся к вероятному масштабу развития, по отношению к аналогичным сценариям 3 и 5 оптимистичного масштаба развития отнюдь не свидетельствует об оптимальности первых. Указанные пары сценариев относятся к решению задач разного масштаба в части удовлетворения потребностей страны в электроэнергии, и каждая из них имеет свою «цену», которая может быть минимизирована

в своих рамках. Развитие по оптимистичному варианту дает значительно больший вклад ЯЭ в общий топливный баланс страны, но требует больших инвестиций, эффект от которых должен оцениваться при анализе более широкой энергетической системы страны, вмещающей ЯЭ.

Заключение

На основе сценарных системных исследований развития ЯЭ России (с учетом экспорта на уровне 30-50% от внутренних мощностей) показано преимущество скорейшего перехода на НТП с доминированием БР естественной безопасности и ЗЯТЦ (проект «Прорыв»), исходя из критериев:

- общей безопасности системы ЯЭ (полнота перехода на НТП с полной переработкой ОЯТ и минимизацией радиоактивных отходов);
- энергобезопасности (самодостаточность в пределах располагаемых национальных ресурсов);
- минимизации абсолютных затрат на единицу мощностей НТП;
- минимизации общесистемного тарифа безубыточности (SLCOE).

При условии подтверждения работоспособности и ожидаемых характеристик головных блоков БР-1200 на рубеже 2030 г. целесообразно прекратить ввод ВВЭР к 2040 году. Топливный баланс замкнутого ЯТЦ следует ориентировать на поступление продуктов массовой переработки ОЯТ ВВЭР не ранее 2040 года.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Концепцию использования МОКС-топлива в реакторах ВВЭР с передачей плутония из ОЯТ МОКС для получения топлива БР необходимо признать неэффективной; выигрыши от использования МОКС- и РЕМИКС-технологий, дающие до 30% экономии урана в однокомпонентной ЯЭ на ТР, в двухкомпонентной ЯЭ с БР теряют

свое значение, а главным фактором становится быстрейшая замена ТР на БР с полным замыканием ЯТЦ. До начала экспорта технологий БР и ЗЯТЦ должна быть определена политика использования национальных ресурсов урана с учетом их ограниченности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. М.: Минатом России, 2000. Одобрена Правительством РФ 25.05.2000 г.

2. Аналитическая записка «Крупномасштабная двухкомпонентная ядерная энергетика с замкнутым ЯТЦ на базе реакторов на быстрых нейтронах». М.: ГК «Росатом», Проектное направление «Прорыв», 2017.

3. Толстоухов Д.А. Конкурентоспособность быстрых реакторов с ЗЯТЦ. Научно-практическая конференция «Проектное направление «ПРОРЫВ». Результаты реализации новой технологической платформы», 2015.

4. С.Б. Рыжов, В.А. Мохов, И.Н. Васильченко. Конструкция активных зон новых ВВЭР и опыт эксплуатации ближайших прототипов. В материалах конференции «Обеспечение без-

опасности АЭС с ВВЭР», ОАО ОКБ «ГИДРО-ПРЕСС», 17-20 мая 2011.

5. Техничко-экономические исследования эффективности РЕМИКС-технологии в ядерно-энергетической системе с замкнутым топливным циклом. Госрегистрация № 4178. СПб, АО «АТОМПРОЕКТ» ГК «Росатом», 2014.

6. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / под ред. Н.Н. Пономарева-Степного, М.: Техносфера, 2016.

7. Прогноз развития энергетики мира и России 2016. М.: ИНЭИ РАН, Аналитический центр при Правительстве РФ. 2016.

8. В.И. Рачков. Формирование двухкомпонентной ЯЭ в рамках стратегии развития ЯЭ России. Доклад на совместном заседании НТС-1 и НТС-8 ГК «Росатом», Москва, 23.03.2017.

Поступила в редакцию
22.05.2017 г.

E.V. Muravyev²

THE CONCEPT OF TWO-COMPONENT NUCLEAR POWER INDUSTRY IN RUSSIA AS PART OF THE DEVELOPMENT STRATEGY

A system research was conducted in order to determine an economically optimal scenario for implementation of a new technology platform for the nuclear power industry based on the Proryv (Breakthrough) Project developments taking into account the interaction of fuel cycles of thermal and fast reactors when getting onto the deployment of a large-scale nuclear power industry with inherent safety. The paper provides recommendations on the choice of economically optimal solutions for implementation of the Proryv Project technologies.

Key words: nuclear power industry development, system modeling, closure of nuclear fuel cycle, fast reactors, SNF, SNF reprocessing, fast reactor fuel.

² Evgeny V. Muravyev – Head of Department at the Innovation and Technology Center for the Proryv Project of the State Atomic Energy Corporation Rosatom, Doctor of Engineering, e-mail: meb@proryv2020.ru

УДК 621.039 (470+571)

С.А. Субботин, Т.Д. Щепетина¹

СИСТЕМА АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ КАК ИНТЕГРИРУЮЩИЙ ФАКТОР ТЭК

Рассматриваются возможности синергетического взаимодействия атомной энергетики в виде атомных станций малой мощности (АСММ) с добывающими отраслями ТЭК для возможностей расширения ресурсной базы углеводородного сырья (УВС) и снижения экологической нагрузки. Анализируются несколько типов атомно-энергетических комплексов по добыче и переработке тяжелой нефти или ожигания угля, особенно содержащего много радиоактивных примесей.

Ключевые слова: атомная энергетика, атомные станции малой мощности (АСММ), когенерация, ТЭК, углеводородное сырье, тяжелая нефть, уголь, синтетическое жидкое топливо, расширение ресурсной базы, риски, система АСММ.

Введение

В мире все большее внимание уделяется вопросам энергетической безопасности, под которой подразумевается защищенность граждан, государства и общества от дефицита энергии и экономически приемлемых энергетических ресурсов. Автономные, безопасные, мобильные атомные станции малой мощности (АСММ) способны решать задачи энергоснабжения любого рода в различных странах мира, создавая тем самым все условия для обеспечения энергетической безопасности таких стран. Кроме того, возрастает социально-экономический потенциал региона локализации АСММ. В связи с этим международный интерес к малой ядерной энергетике увеличивается, о чем свидетельствует рост числа стран как развитых, так и развивающихся, ведущих под эгидой МАГАТЭ научно-исследовательскую деятельность по созданию АСММ нового поколения.

Реальное внедрение АСММ в современных рыночных условиях может произойти только в таких проектах, в которых АСММ будут не самоцелью, а инструментом эффективного решения более глобальных инфраструктурных задач. Перспективной является концепция когенерационных производств, в которых за счет энергии, производимой АСММ, может быть получена полезная продукция с высокой добавленной стоимостью. Доходность такого предприятия должна оцениваться по совокупности, поскольку в этом случае есть основания, что она

будет существенно превышать доход от простого производства электроэнергии.

Анализ аспектов энергетической безопасности показывает наличие ряда серьезных угроз, связанных с инфраструктурными особенностями ТЭК, среди которых уязвимость газотранспортных систем, сложность создания больших запасов газа, снижение инвестиций в ТЭК и неуклонно происходящее затруднение доступа к легкодоступным и высококачественным запасам нефти и газа наряду с отставанием природста разведанных легкодоступных качественных запасов.

Эти угрозы могут быть смягчены или устранены при расширении сферы деятельности атомной энергетики (АЭ) как составной части ТЭК. АЭ вполне может стать гармонизирующим фактором топливно-энергетических структурных изменений через расширенное внедрение АСММ в сферы энергообеспечения смежных отраслей, связанных с добычей и переработкой углеводородов.

Предполагается рассматривать не одиночный проект АСММ, а целый класс ядерных энергоустановок (ЯЭУ) предназначенных для комплексного использования, характеризующихся внутренней самозащищенностью, основывающейся на использовании природных физических законов и адекватных методов конструирования. Данные АСММ могут производить в любой пропорции и наборе электроэнергию и различную когенерационную продукцию.

¹ Станислав Анатольевич Субботин – начальник отдела НИЦ «Курчатовский институт», к.т.н., e-mail: Subbotin_SA@nrcki.ru; Татьяна Дмитриевна Щепетина – начальник лаборатории НИЦ «Курчатовский институт», к.т.н. e-mail: Schepetina_TD@nrcki.ru

Перечисленные качества позволяют располагать АСММ в непосредственной близости к удаленным или труднодоступным населенным пунктам, промышленным комплексам, отдельным промышленным объектам и в максимальной степени без потерь использовать не только электроэнергию, но и тепло.

АСММ модульного типа можно полностью изготавливать в заводских условиях и доставлять в снаряженном состоянии на площадку любым из возможных путей (морской, автомобильный, ж/д, воздушный), экономя тем самым на строительных и монтажных работах на площадке.

Срок окупаемости АСММ будет определяться регионом размещения, учитывая, что в удаленных или труднодоступных районах приемлемой является стоимость 1 кВт·ч во много раз выше, чем в централизованных энергосистемах.

Согласно МАГАТЭ, в настоящее время в 13-ти странах существует около 60-ти инновационных проектов реакторов малой и средней мощности различной степени готовности. Но из более чем 30-ти проектов АСММ без перегрузки ядерного топлива на площадке, разрабатываемых в мире, большинство находится в стадии концептуального проекта или технического предложения [1].

АСММ как гармонизирующий фактор топливно-энергетического комплекса

Возможности расширения сырьевой базы. Топливо-энергетический комплекс является системообразующим базисом для экономики любой страны и мира в целом. Поэтому определяющим фактором успешного и долгосрочного развития экономики должна являться не прибыль от добычи и продажи ресурсов, а наличие экономически доступных ресурсов с учетом жизненного цикла тех технологий, которые ориентируются на их использование в течение длительного времени, поскольку история развития экономик показывает, что богатеют не те, кто добывает ресурсы, а те, кто научился их эффективно использовать. Рачительное хозяйствование – это использование ресурсов согласно их уникальным свойствам: газ, нефть – как сырье для органического синтеза, уран и торий – как энергоресурс.

Роль АЭ, как гармонизирующего фактора ТЭК, заключается в первую очередь в постепенном замещении газа в электрогенерации и использовании его на собственные технологические нужды отрасли (для энергообеспечения перекачки и сжижения), а также в принципиальном расширении ресурсной базы углеводородного сырья за счет вовлечения в хозяйственный оборот огромных запасов тяжелых нефтей.

Многопродуктовость системы АСММ в первую очередь ассоциируется с их неэлектрическим применением в составе атомных энерго-технологических комбинатов – АЭТК. Список энерготехнологических применений АСММ обычно представляется следующим:

- получение пресной воды;
- газификация угля и производство синтетических моторных топлив (СЖТ);
- горячая вода (пар) для глубокого извлечения тяжелой нефти;
- производство водорода для переработки неконвенционных нефтей в СЖТ;
- экономия газа на собственные технологические нужды (на перекачку 10-15%, на сжижение 25-30%);
- высокотемпературный сегмент технологий переработки сырья;
- глубокая переработка полезных ископаемых;
- производство сельхозпродуктов в условиях искусственного климата.

Актуальность использования ЯЭ для опреснения морской воды становится все более очевидной. В настоящее время приблизительно 23 млн м³/сутки опресненной воды производится 12500 станциями, сооруженными в различных частях мира. Для энергоснабжения этих станций в значительной степени используют источники энергии на органическом топливе, поэтому выбор эффективного энергоисточника является одним из наиболее принципиальных вопросов повышения экономической эффективности процесса опреснения. В этом плане использование ядерных реакторных установок в качестве энергоисточников в составе опреснительных систем может оказаться весьма перспективным.

Перспективы применения АСММ видны для расширения сырьевой базы при максимальном

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

сохранении и использовании сложившихся глобальных инфраструктур добычи УВС и производства нефтепродуктов. Именно здесь открывается актуальная инновационная ниша для практической реализации АСММ, как ведущей силы гармонизации ТЭК, через организацию техногенного водородного цикла, который позволит организовать сбалансированный ТЭК, и в котором каждый энергоресурс как бы помогает друг другу в повышении качества использования и системной эффективности всего ТЭКа.

Уникальная возможность использования нефтепродуктов на транспорте создала большую потребительскую ренту этому ресурсу по отношению ко всем остальным энергоносителям. И за многие десятилетия масштабного использования жидкие моторные топлива стали системообразующим жизненно важным элементом для глобальной транспортной инфраструктуры.

Однако время простых решений заканчивается, и мы постепенно подходим к границе смены технологических укладов, основанных на использовании доступных качественных ресурсов нефти. Если в 1950 г. на добычу 200 баррелей нефти тратили 1 баррель энергии, в 2008 г. – 1 баррель энергии, тратили на добычу 5 баррелей нефти, то в среднем по России тратится 1 баррель энергии чтобы добыть 2 барреля нефти.

С другой стороны, на высоких государственных уровнях разных стран в последнее время декларируются в качестве перспективы: водородная энергетика, водородная экономика, водородная цивилизация. Как важнейший вариант решения экологических проблем предлагается «энергoэкологическая революция» на основе применения водорода. Кроме задачи снижения выбросов этот «водородный вектор» нацелен на сохранение природных ресурсов нефти и газа для будущих поколений и как ценного сырья для производства пластмасс и другой химической продукции, а также в качестве топлива для транспортных средств. Связующим звеном этих разных тенденций в ТЭК может стать атомная энергетика в виде системы АСММ.

Консолидация нефтяной и атомной отраслей экономики. Консолидация усилий атомной и нефтяной отраслей может дать ощутимый синергетический эффект как на уровне всего ТЭКа, так и в социально-экономических сферах. Атом-

ная энергетика в общей стратегии ТЭК – это не альтернатива и не конкурент, а потенциал сохранения эффективности нефтегазового комплекса на долгие годы, способный повысить надежность и безопасность энергоснабжения. АЭ становится «источником источника» энергии и других ресурсов.

Разработка месторождений тяжелых и вязких нефтей становится все более актуальной. Извлекаемость нефти в виде легких фракций зачастую составляет 30-35%, поэтому при сокращении отдачи встает вопрос или прекращения добычи и ликвидации созданной вокруг месторождения производственной, транспортной и социально-бытовой инфраструктуры, или о переходе на добычу оставшихся тяжелых фракций с помощью других методов. Как правило затраты на добычу возрастают в 3-4 раза.

Следует подчеркнуть, что продление жизни месторождений с падающей добычей, в недрах которых остается еще 65-70% УВС, по принципу организации на них атомных энерготехнологических комплексов является актуальной задачей как социально-экономического, так и энергоресурсного плана. Это обусловлено еще и тем, что разведка и освоение новых месторождений связаны с огромными инвестиционными вложениями, которые необходимо будет сделать в довольно короткое время, что трудно сделать даже в мобилизационном типе экономик, не говоря о либеральной рыночной экономике.

К числу наиболее прогрессивных и энергетически целесообразных способов разработки месторождений тяжелых и вязких нефтей следует отнести использование атомной энергии для энергообеспечения процессов добычи и первичной или глубокой переработки тяжелых нефтей для обеспечения их транспортировки по обычным трубопроводным и продуктопроводным системам. Для этого применяется закачивание водяного пара в пласты. Если, например, для выработки пара необходимы парогенераторы производительностью 10-50 т пара в час при давлении 2,5-5,0 МПа, то эквивалентная мощность реакторной установки составит около 25 МВт. Это средний уровень мощностей из ряда реакторов малой мощности. Параметры пара практически совпадают с показателями современных хорошо освоенных реакторных

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

установок водо-водяного типа. Помимо технологических процессов, АСММ может снабжать электро- и теплоэнергией жилой поселок и других промышленных потребителей.

Следует особо подчеркнуть, что при организации АЭТК на истощающихся месторождениях сохраняется и продолжает использоваться производственная и бытовая инфраструктуры, имеющиеся дороги и трубопроводы, работа месторождения продолжается и снимается угроза социальной напряженности. Наблюдается закономерность, что нефтепереработка удваивает доход, получаемый от нефти, а нефтехимия утраивает его.

Это можно проиллюстрировать таким примером:

- для добычи 1 т тяжелой нефти в час необходимо 5 т пара;
- АСММ мощностью 100 МВт тепловых может произвести 30 МВт эл., то есть 210 млн кВт·ч в год, при цене 10 цент/кВт·ч выручка составит 21 млн долл. в год;
- та же АСММ мощностью 100 МВт тепл. может произвести 200 т/час пара для добычи 40 т/час тяжелой нефти, что даст минимум 20 т/час синтетической нефти, или 900 тыс. баррелей синтетической нефти в год, при ее цене 60 долл./баррель, выручка составит 54 млн долл. в год.

Для решения таких задач на первых порах вполне подойдут наиболее освоенные типы АСММ (водо-водяного типа), но наиболее экономически эффективными будут выглядеть высокотемпературные реакторы (типа ВТГР) с прямым использованием тепла для процессов получения водорода и радиационно-термического крекинга минуя преобразование в электричество.

Применение ВТГР для производства жидкого топлива из угля. Как показали ранее выполненные исследования, ВТГР является наиболее перспективным многоцелевым реактором-кандидатом для энерготехнологических приложений, позволяющим производить не только электричество, но и высокопотенциальное тепло [4]. Это обстоятельство обуславливает попытки рассмотрения возможностей его применения в качестве энергоисточника для производства синтетического жидкого топлива из угля как инновацион-

ную ядерно-энергетическую систему, совмещающую высокотемпературный газовый реактор и химическое производство жидкого топлива из угля на одной площадке.

Например, в Забайкальском крае практически нет месторождений бурого угля, не загрязненных естественными радионуклидами, причем запасы таких углей довольно существенны. Поэтому переработка такого угля в синтетическое жидкое топливо (особенно в случае применения непрямого сжижения) приведет к существенному снижению выброса в атмосферу радиоактивных веществ. Следует отметить, что радиоактивность угля не является характерной чертой российских месторождений – эта проблема всей мировой угольной энергетики. Российские бурые угли просто не являются исключением из общего правила [5].

Одна тонна энергетического угля дает выход примерно в 1200 м³ синтез-газа, что, в свою очередь, позволяет получить приблизительно 530-570 кг жидкого синтетического топлива. С учетом того что предполагаемая производительность завода по производству синтетического жидкого топлива из угольного сырья составляет 500 тыс. т, ежегодная добыча угля должна составлять не менее 943400 т.

Производство синтетического жидкого топлива (СЖТ) из бурого угля сопряжено с потреблением тепловой энергии, которая в традиционных технологиях обеспечивается сжиганием части сырья, то есть угля. Вовлечение тепла атомных реакторов для целей энергообеспечения отдельных процессов в технологии производства СЖТ позволит сэкономить более половины традиционно потребляемого сырья, а также предотвратить попадание в атмосферу радиоактивности вместе с продуктами сгорания.

Поскольку метод непрямого ожижения угля позволяет получать конечный высокочистый продукт, то применение такой технологии позволит использовать даже так называемый комплексный уголь, непригодный вследствие его высокой радиоактивности для использования в качестве топлива в отопительных котельных и домашних бытовых печах, а также на ТЭС. Такого угля, например, на Уртуйском месторождении уже добыто 750 тыс т.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Таблица 1

Оценка ежегодных предотвращенных объемов выхода урана в окружающую среду, расходы угля при использовании и без использования АЭ для производства СЖТ

Год начала этапа	2035	2040	2085 (мин)	2085 (макс)
Мощность реакторов, ГВт тепл.	0,6	1,2 (пилотный кластер)	4,8	
(8 модулей)	7,2			
(12 модулей)				
Производство СЖТ, тыс. т в год	416,1	832,2	3 328,8	4 993,2
Потребление угля для его переработки в СЖТ*, тыс. т в год	1450	2900	11 600	17 400
Потребление угля для его переработки в СЖТ **, тыс. т в год	725	1 450	5 800	8 700
Предотвращенные выбросы:				
летучей золы*, тыс. т	10,37	20,74	82,94	124,41
урана*, т в год (У)	9	18	75	112
урана*, т в год (Ср)	6	13	54	80
летучей золы**, тыс. т	5,18	10,37	41,47	62,21
урана**, т в год (У)	5	9	37	56
урана**, т в год (Ср)	4	6	26	40

Примечание: (У) и (Ср) – для концентрации урана по значениям, характерным для ургуйского угля и по средневзвешенному значению концентрации урана в углях региона.

* – варианты без применения атомной энергии;

** – варианты с использованием атомной энергии.

Приведенные оценки позволяют сделать вывод, что энерготехнологический кластер, сочетающий высокотемпературные газовые реакторы и производство жидких моторных топлив путем переработки угля, может иметь длительную перспективу с точки зрения обеспечения сырьевыми ресурсами для производства топлива, а именно бурыми углями.

Выполненные оценки ежегодных объемов производства синтетического жидкого топлива и предотвращенных выбросов урана в окружающую среду показали, что применение ВТГР в качестве энергоисточника для химического производства синтетического жидкого топлива позволит снизить воздействие предлагаемой технологии на окружающую среду.

В табл. 1 приведены результаты оценок ежегодных объемов выхода в окружающую природную среду урана (в золошлаковых отходах и газоаэрозольных выбросах).

Инвестиционная привлекательность АСММ

При выборе проекта, сравнивая и рассматривая разные альтернативы, в первую очередь инвесторы обращают внимание на одномоментные или на удельные капитальные затраты, что не всегда целесообразно. Одномоментная экономия не всегда приводит к экономии в целом. Следует учитывать, что затраты нужно просчитывать на весь цикл жизни проекта вплоть до его вывода из эксплуатации. Сосредоточение экономии на удельных капитальных затратах приводит к меньшей суммарной прибыли самого проекта, особенно в эпоху снижения ставок рефинансирования основных резервных валют.

Эксплуатационная надежность – так же один из важнейших параметров проекта АЭС. Бесперебойная поставка электроэнергии зачастую является миссией всех энергогенерирующих ком-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

паний. Путем диверсификации мощностного ряда установок на стадии эксплуатации можно снизить риски с перебоями поставки электричества, в первую очередь потому, что в работе остаются (n-1) блоков/модулей, если случится какая-то аварийная остановка одного модуля или необходима будет перегрузка топлива. Это позволяет компании непрерывно получать прибыль от работы на площадке других модулей за время не только плановой перегрузки топлива, но и в случае аварийного останова одного модуля [2].

Путем снижения единичной мощности, кроме явно выраженных количественно экономических рисков, можно минимизировать риски, связанные с ядерной и радиационной безопасностью. В системе ЯЭ, основанной на АСММ, значительно легче выполнить требования по безопасности, экологической приемлемости, нераспространению ядерных материалов в силу принципиальных физических отличий АСММ от АС большой мощности. Атомно-энергетическое сообщество имеет достаточно большой опыт проектирования и эксплуатации реакторов большой мощности. Основным априорным преимуществом малых реакторов перед большими в области безопасности считается именно «эффект масштаба». Если согласиться с тем, что безопасность можно измерять, например, математическим ожиданием выхода радионуклидов в среду обитания, и что риск пропорционален произведению этого математического ожидания на количество радионуклидов, которые могут выйти в среду обитания, то понижение единичной мощности реактора при других равных условиях (уровень знаний, технологий, технических и финансовых возможностей) при-

водит к принципиальному улучшению безопасности (понижение единичной мощности блока в 10 раз, например, от 1000 до 100 МВт, приводит к снижению интегральной опасности в 1000 раз, как это приводится в работе [3]). Это означает, что при выборе варианта компоновки АЭС мощностью 1000 МВт из 10-ти модулей единичной мощностью по 100 МВт даст снижение интегрального риска в 100 раз.

Таким образом, блоки АСММ могут занять определенное место и в крупных энергосистемах, как альтернатива блокам большой единичной мощности, объединив преимущества снижения рисков как экономических, так и ядерно-радиационных.

В связи с тем что несколько блоков модульных станций можно строить одновременно и вводить в эксплуатацию по мере готовности в более короткие сроки нежели крупные АЭС, следует сделать вывод, что снижается риск роста затрат от увеличения срока строительства АЭС. Конструктивные особенности модульных атомных станций малой и средней мощности, собираемых в заводских условиях, позволяют устанавливать реакторные установки (РУ) на площадке уже готовыми к эксплуатации, что снижает сроки строительства, транспортировки и наладки АЭС, в отличие от АЭС большой мощности, монтируемых непосредственно на площадке.

Например, серийное и промышленное производство модульных РУ средней мощности с блоком мощностью 300 МВт эл. позволит довести сроки строительства одного энергоблока до 3-3,5 лет, что сократит сроки начала возврата кредитов и увеличит коммерческую привлекательность и конкурентоспособность атомных

Таблица 2

Сравнительная характеристика рисков больших и малых АС

Риски и вызовы	Блок АЭС 1000 МВт	Модульные АЭС малой и средней мощности
Риск роста затрат от увеличения срока строительства	Достаточно велик	Снижается за счет небольшого габарита и сборки в заводских условиях
Проблема поиска инвестора	Только крупные компании, не менее 5-6 млрд долл.	Расширение круга инвесторов, рискикратно меньше
Относительные удельные капитальные затраты	1	1,2 -2,0

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Окончание табл. 2

Риски и вызовы	Блок АЭС 1000 МВт	Модульные АЭС малой и средней мощности
Риски с перебоями поставки электричества	Риск присутствует, ущерб большой	Риск присутствует, но ущерб снижается в несколько раз в зависимости от количества модулей
Использование для технологических целей	В ближайшее время неприменимо	Широкие возможности приближения к населенным пунктам и производствам
Минимальный резерв мощности в энергосистеме	Равен мощности блока (1000 МВт)	Равен мощности блока (100-300-500 МВт)
Риски, связанные с ядерной и радиационной безопасностью	Оцениваются вероятностными методами	Детерминистически снижается и вероятность рисков, и величина самого ущерба
Риски на стадии вывода из эксплуатации	Большой объем демонтажа, высокие дозозатраты	Крупно-модульный демонтаж, снижается и вероятность рисков и величина облучения
Экспортные риски	Рынок относительно невелик, конкуренция высокая	Появление новых рыночных ниш и конкурентных преимуществ
Возможность страхования гражданской ответственности	В полном объеме нет, почти невозможно	Возможно по многим программам страхования
Наличие площадок размещения	Ограничено	В рамках региональной энергетики практически повсеместно
Повторное использование промплощадки	Практически невозможно	Возможно
Приемлемость обществом	Психологические барьеры (особенно после аварий ЧАЭС и Фукусимы)	Возможность наглядной доказательности повышенной безопасности блоков МСМ

станций с такими энергоблоками, в то время как строительство одного блока АЭС большой мощности занимает минимум 5-6 лет.

Другими словами это означает, что за те два года, пока достраивается (по плану) блок АЭС большой мощности, с продажи электроэнергии от первого модуля станции, в данном случае модуль мощностью 300 МВт эл., даст возможность получить до 10 млн долл. прибыли (выручка составит около 20 млн долл.). Можно кратко резюмировать преимущества системы АС малых и средних мощностей в виде табл. 2.

Заключение

Объединение потенциалов различных технологий дает эффект, заведомо превышающий их экономические показатели при отдельном функционировании. Такую стратегическую задачу можно считать прорывным мегапроектом со значительным синергетическим эффектом.

Например, если производство чисто электроэнергии АС дает условно единичную доходность, а энергообеспечение добычи тяжелых нефтей обычными способами при генерации технологического пара с помощью углеводородного топлива может поглощать до половины добываемого сырья, то использование только тепловой энергии от АС для добычи нефти позволит оценивать совокупный доход такого АЭТК в среднем в 3 единицы.

Простое сжигание угля может привести к серьезным экологическим последствиям в виде накапливающегося загрязнения среды радионуклидами, содержащимися в угле и трудно поддающихся улавливанию. Переработка высоко-радиоактивного угля в СЖТ с использованием энергии самого угля также малоэффективна в этом плане, так как выбросы аэрозолей в атмосферу остаются. Вовлечение АЭ в решение системных задач ТЭКа позволяет как расширить ресурсную базу существующих топлив, так и

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

ввести дополнительные синергетические ресурсы при одновременной заботе о чистоте окружающей среды.

Ключевую роль в реализации таких проектов будет играть создание энергообеспечивающей структуры, которая может располагаться максимально близко к местам добычи и обладать высокой экологичностью и безопасностью – системы АС малой и средней мощности.

Преимущества системы АСММ в расширении ресурсной базы УВС, а также в повышении безопасности, надежности энергопоставок и снижении многих существенных рисков по всему жизненному циклу энергоисточников при переходе от блоков большой мощности к блокам малой или средней мощности на первых этапах развития потребуют дополнительных инвестиций, но это компенсируется снижением рисков в будущем и, соответственно, ростом инвестиционной привлекательности всего ТЭК.

Для реализации развития ТЭК в направлении экономичного производства водорода, эффективного использования сырья, адекватного энергообеспечения всех технологических процессов и социальных потребностей необходимо сформулировать системную задачу, сочетающую микроэкономические и макроэкономические подходы и институциональные преобразования в хозяйственной сфере, призванные согласовывать риски и выгоды, разнесенные по значительным временным интервалам и различным технологиям и регионам, и способствующие единению долговременных интересов федеральной и региональной, законодательной и исполнительной ветвей власти, привлечению крупного капитала, координированию усилий государства, бизнеса и науки по развитию водородной экономики и оздоровлению окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев И., Коровяков О., Удянский Ю. Маркетинговые исследования атомных станций малой и средней мощности // Клуб ЗД. Инновационное проектирование. 2012. № 6. С. 139-154.

2. Размер имеет значение – чем меньше, тем лучше // [Электронный ресурс] www.atominfo.ru/news/air4641.htm

3. Hatori S. Energy source for human demand // *Advanced Nuclear Systems Consuming Excess*

Plutonium. – Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1997. P. 69-77.

4. Пономарев-Степной Н.Н., Столяревский А.Я., Пахомов В.П. Атомно-водородная энергетика. М.: Энергоатомиздат, 2008 г., 108 с.

5. Сидорова Г.П., Крылов Д.А. Радиоактивность углей и золошлаковых отходов угольных электростанций / Чита: ЗабГУ, 2016. 237 с.

Поступила в редакцию
23.05.2017 г.

S.A. Subbotin, T.D. Shchepetina²

SMALL NUCLEAR POWER PLANT SYSTEM AS AN INTEGRATING FACTOR OF THE FUEL AND ENERGY COMPLEX

The paper considers opportunities for synergetic interaction between the nuclear industry in the form of small nuclear power plants (SNPP) and extractive industries of the Fuel and Energy Complex in order to expand the hydrocarbon resource base and reduce the environmental impact. The paper analyzes several types of nuclear power complexes for extraction and processing of heavy oil or coal liquefaction, especially when coal contains many radioactive impurities.

Key words: nuclear energy, nuclear station of low power (NSLP), cogeneration, FEC, hydrocarbons, heavy oil, coal, synthetic liquid fuels, expansion of the resource base, risks, system NSLP.

² Stanislav A. Subbotin – Head of Department at the Research Center «Kurchatov Institute», PhD in Engineering, e-mail: Subbotin_SA@nrcki.ru;
Tatyana D. Shchepetina – Head of Laboratory at the Research Center «Kurchatov Institute», PhD in Engineering, e-mail: Schepetina_TD@nrcki.ru

УДК 621.039+621.311 (470+571)

Ф.В. Веселов, А.С. Макарова, Т.В. Новикова, Д.А. Толстоухов, П.В. Атюкова¹

КОНКУРЕНТНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ АЭС В ФОРМИРОВАНИИ НИЗКОУГЛЕРОДНОГО ПРОФИЛЯ РОССИЙСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

В статье рассматриваются возможности для перехода к сценариям низкоуглеродного развития электроэнергетики России при нарастающих экологических вызовах. На основе экономического сравнения современных высокоэкономичных технологий газовой генерации, атомной и возобновляемой энергетики (с учетом сопутствующих системных эффектов) оцениваются предпосылки для реализации подобного перехода при максимальном использовании потенциала атомной энергетики в России, с учетом изменения ее конкурентоспособности и удельной стоимости снижения эмиссии CO₂.

Ключевые слова: электроэнергетика, атомные электростанции, возобновляемые энергоресурсы, парниковые газы, экономическая эффективность.

Стратегические вызовы для российской электроэнергетики в первой половине XXI века

Непростой и длительный процесс формирования новой Энергетической стратегии России до 2035 года осуществляется в период нарастающих неопределенностей развития энергетики страны в условиях новых геополитических, макроэкономических, технологических и экологических вызовов. Поиск ответов на них, в том числе при помощи современных модельных инструментов, позволяет получить видение развития российского энергетического комплекса (ЭК) как надежной и эффективной инфраструктуры для долгосрочного экономического роста экономики страны.

При прогнозировании развития ЭК традиционно особое место занимает электроэнергетика, обладающая уникальным потенциалом использования практически всех энергоресурсов для нужд электроснабжения и централизованного теплоснабжения промышленных, коммерческих и бытовых потребителей. Одной из важнейших тенденций развития ЭК в первой половине XXI в. является увеличение роли электроэнергии в обеспечении энергетических нужд экономики за счет углубления электрификации в промышленности, на

транспорте и в быту. При ожидаемом росте экономики со среднегодовыми темпами в 2-3% (в среднем за период 2015-2035 гг.) внутреннее потребление первичной энергии к 2035 г. увеличится всего на 13-16%, а потребление электроэнергии будет расти вдвое быстрее – на 30-35% (табл. 1).

Обеспечение ускоренного (относительно других энергоносителей) развития электроэнергетики будет определяться двумя тенденциями, существенно влияющими в перспективе на технологическую структуру генерирующих мощностей. Одной из них является интенсивное обновление действующих электростанций. К 2035 г. потребуются обеспечить замещение до 80% мощностей тепловых (ТЭС) и 50% атомных (АЭС) электростанций. Другой тенденцией является усиление межтопливной конкуренции в треугольнике тепловая-атомная-возобновляемая энергетика из-за совместного действия таких факторов, как рост цен топлива, повышение экологических требований, улучшение энергетических и стоимостных показателей новых технологий, использование специальных мер стимулирования и поддержки со стороны государства технологических направлений, соответствующих требованиям энергетической безопасности, а также обеспечивающих раз-

¹ Федор Вадимович Веселов – заведующий отделом Института энергетических исследований (ИНЭИ) РАН, к.э.н., e-mail: erifedor@mail.ru;

Алла Семеновна Макарова – ведущий научный сотрудник ИНЭИ РАН, к.э.н. e-mail: alla@eriras.ru;

Татьяна Владимировна Новикова – научный сотрудник ИНЭИ РАН, к.э.н., e-mail: ntv@eriras.ru;

Дмитрий Алексеевич Толстоухов – главный экономист проектного направления «Прорыв» – Инновационно-технологического центра ГК «Росатом», к.т.н., e-mail: tda@progv2020.ru;

Полина Владимировна Атюкова – ведущий экономист отдела главного экономиста проектного направления «Прорыв» – Инновационно-технологического центра ГК «Росатом», к.э.н., e-mail: apv@progv2020.ru

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Таблица 1

Основные характеристики развития электроэнергетики России до 2035 года

Показатели	Отчет	Консервативный		Оптимистичный	
	2015 г.	2025 г.	2035 г.	2025 г.	2035 г.
Внутреннее электропотребление, млрд кВт·ч	1051	1180	1370	1205	1420
Установленная мощность – всего, млн кВт	252	266	291	272	297
в том числе:					
- ГЭС	51	54	57	56	63
- АЭС	27	31	35	31	36
- КЭС	84	80	82	83	83
- ТЭЦ	90	94	106	94	105
- НВИЭ	1	7	12	8	9
Производство электроэнергии - всего, млрд кВт·ч	1064	1190	1380	1230	1470
в том числе:					
- ГЭС	170	195	207	204	230
- АЭС	195	223	250	227	269
- КЭС	332	352	428	372	437
- ТЭЦ	365	405	466	407	488
- НВИЭ	2	16	29	21	46

витие высокотехнологичных, инновационных секторов экономики, обладающих экспортным потенциалом.

Последствия действия этих тенденций проявляются в сценариях Энергетической стратегии (табл. 1), во-первых, в виде снижения среднего удельного расхода топлива на ТЭС на 7-13% к 2035 г. (а для газовых ТЭС – на 15-20%), а во-вторых – в виде повышения роли неуглеводородных электростанций (АЭС и ВИЭ). Их доля в структуре установленной мощности в 2035 г. вырастает на 4,5-5,5% (до 35,5-36,5%), однако в структуре производства электроэнергии всего на 0,7-2,6% (до 35-37%). При этом достаточно быстрым оказывается рост с нуля возобновляемой энергетики (рост выработки в 13-20 раз), в то время как рост атомной энергетики продолжится примерно с темпом электропотребления – в итоге к 2035 г. доля АЭС в структуре производства электроэнергии существенно не превысит отчетный уровень.

Относительно небольшие масштабы структурных изменений в электроэнергетике отчасти определяются узким диапазоном согласованных сценариев электропотребления, который не вполне соответствует уровню неопределенностей в динамике и структурной перестройке экономики страны и отдельных регионов. Поэтому представляется важным дополнительный анализ возможности увеличения производственного потенциала электроэнергетики и его более сильной структурной перестройки в ответ на новые экономические вызовы.

Другим немаловажным фактором являются экологические аспекты развития электроэнергетики, значимость которых возрастает в связи с участием России в глобальных климатических инициативах. Наша страна является пятым по величине (после Китая, США, Индии и ЕС) эмитентом парниковых газов (ПГ), формируя около 4-5% суммарных выбросов на планете. Основная часть парниковых газов связана с добычей и ис-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Таблица 2

Структура выбросов парниковых газов в России в сравнении с базовым (1990) годом

Показатели	1990 г.	2014 г.	2014 г. к 1990 г., %
Энергетика	3250	2355	72
- в т.ч. электростанции	789	563	71
Промышленные процессы и использование продукции	298	213	71
Сельское хозяйство	315	133	42
Землепользование, изменение землепользования и лесное хозяйство	165	-513	
Отходы	77	112	145
Всего, без учета землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства	3940	2812	71
Всего, с учетом землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства	4105	2299	56

Источник: Росгидромет РФ, электростанции – расчеты ИНЭИ РАН.

пользованием (сжиганием) органического топлива на энергетические нужды (табл. 2), из них около четверти приходится на тепловые электростанции. В настоящее время годовой объем эмиссии ПГ (с учетом землепользования и лесного хозяйства) заметно (примерно на 45%) ниже уровня базового 1990 года. При этом текущий уровень эмиссии от энергетических источников ниже базового менее чем на 30%.

Имеющийся резерв выбросов, сформированных в результате сильного изменения структуры экономики и энергетического баланса страны в последние годы, позволял России без особых усилий выполнять обязательства в рамках Киотского протокола. Однако климатические инициативы, одобренные в 2016 г. на XXI Конференции по климату в Париже (Парижские соглашения), предполагают более жесткие и долгосрочные ограничения. В частности, целевым ориентиром для России к 2035 г. является снижение выбросов ПГ на 25-30% от уровня базового 1990 г. при максимальной поглотительной способности лесов.

Новые экологические требования становятся серьезным вызовом и для электроэнергетики, поскольку в рамках сценариев Энергетической стратегии годовой объем эмиссии возрастает к

2035 г. на 8-13%, оставаясь ниже уровня 1990 г. всего на 21-24%. Риски, связанные с более интенсивным экономическим ростом, а также неопределенностью методики определения вклада лесов в общий объем эмиссии ПГ, делают актуальной оценку дополнительных возможностей перехода к низкоуглеродному профилю электроэнергетики на базе современных высокоэкономичных технологий газовой генерации (включая когенерацию), атомной и возобновляемой энергетики (включая крупные ГЭС). Ниже в статье рассмотрены экономические предпосылки для реализации подобного перехода при максимальном использовании потенциала атомной энергетики в России с учетом ее конкурентоспособности с другими типами энергоисточников.

Ключевые технологические направления и возможности улучшения технико-экономических показателей русских АЭС

Атомная энергетика является важным структурным сегментом национальной электроэнергетики и традиционной сферой технологического лидерства страны. В настоящее время в России действуют 35 энергоблоков АЭС общей

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

установленной мощностью 27,9 млн кВт, преимущественно на базе реакторов РБМК и ВВЭР единичной мощностью 1000 МВт. В атомной энергетике уже начата программа замещения существующих энергоблоков, достигающих предельного срока эксплуатации, на усовершенствованные блоки с водо-водяными реакторами мощностью до 1200 МВт (проект АЭС-2006).

Реализуемая Госкорпорацией «Росатом» стратегия долгосрочного развития атомной энергетики предусматривает ее движение по двум ключевым технологическим направлениям. Первое из них связано с созданием водо-водяного реактора нового поколения (ВВЭР-ТОИ) с улучшенными эксплуатационными и стоимостными характеристиками, который станет основным типовым проектом для российских АЭС после 2025 г., а также для проектов в других странах. Новые проектные решения при создании энергоблока единичной мощностью 1255 МВт позволили существенно сократить физические объемы оборудования и трубопроводов, уменьшить расходы бетона, снизить трудозатраты при изготовлении конструкций, включая лежащие на критическом пути [1]. Ожидается, что уменьшение площади промплощадки, оптимизация решений по логистике и применение современных строительных технологий позволит сократить сроки строительства типового блока до 40-48 месяцев. В настоящее время удельные капиталовложения в блок ВВЭР-ТОИ оцениваются примерно на 15% ниже по сравнению со строящимися блоками проекта АЭС-2006 (табл. 3), а эксплуатационные затраты – на 10% ниже, чем у лучшей действующей Балаковской АЭС.

Второе направление связано с переходом к двухкомпонентной атомной энергетике, когда традиционные реакторы на тепловых нейтронах будут работать совместно с реакторами на быстрых нейтронах, которые обеспечат замыкание ядерного топливного цикла (ЯТЦ). В России уже имеется опыт строительства и эксплуатации крупных быстрых реакторов. В настоящее время два реактора БН-600 и БН-800 с натриевым теплоносителем работают на Белоярской АЭС, ведутся проектные проработки усовершенствованного реактора БН-1200, который по ключевому стоимостному показателю – удельным капиталовложениям должен быть сопоставим с блоками проекта ВВЭР-ТОИ.

Следующим шагом в развитии технологий ЯТЦ являются разработки реакторов на быстрых нейтронах с так называемой «естественной безопасностью», исключающей возникновение крупномасштабных аварий с широким распространением радиации за пределы активной зоны, требующих отселения людей и длительных и затратных мероприятий по снижению последствий радиоактивного заражения на значительных площадях. В рамках реализации проекта «Прорыв» при сооружении опытного демонстрационного энергетического комплекса впервые в мире должна быть продемонстрирована устойчивая работа полного комплекса объектов (энергоблок на базе РУ БРЕСТ-300 со свинцовым теплоносителем и смешанным плотным нитридным топливом, модуль фабрикации/рефабрикации топлива, модуль переработки топлива) обеспечивающих замыкание топливного цикла. В настоящее время в России ведется разработка конструкторских и проектных решений по реакторам БР-1200, обладающим существенно более высоким уровнем безопасности за счет [2]:

- работы на равновесном плотном нитридном топливе с минимальным запасом реактивности, предотвращающем реактивностные аварии;
- замены теплоносителей потенциально способных мобилизовать радиоактивность, накопленную в активной зоне (перегретой воды, пара или газа при высоком давлении), на инертный свинцовый теплоноситель с высокой температурой кипения;
- отказа от химически активных материалов, связанных с опасностью пожаров и взрывов при взаимодействии с воздухом и водой (но признавая возможность ограниченного использования быстрых реакторов с натриевым теплоносителем на промежуточном этапе отработки технологий замкнутого ЯТЦ).

Предполагается, что типовые энергоблоки на данном типе реакторов будут не только более безопасными, но и менее капиталоемкими по сравнению с реакторами на тепловых нейтронах, как показано в табл. 3, удельные капиталовложения в БР-1200 должны быть на 15-18% ниже, чем у ВВЭР-ТОИ.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Таблица 3

Основные экономические показатели перспективных энергоблоков АЭС

Показатели	Станция с РУ АЭС-2006	АЭС с РУ ВВЭР-ТОИ	АЭС с РУ БР-1200 (требования)
Мощность 1 блока, МВт(эл)	1200	1255	1220
Количество блоков в составе АЭС, шт.	2	2	2
Кгот., %	85	93	93
Затраты эл. энергии на собственные нужды, %	5,5	6,4	5,0
Ежегодный полезный отпуск эл. энергии одного блока, млн кВт·ч	8935	9364	9239
Штатный коэффициент, чел./МВт(эл)	0,5	0,37	0,3
Тип топлива	оксид	оксид	нитрид
Удельная стоимость сооружения АЭС (2014 г., без НДС), тыс. руб./кВт	107	90	74
Срок сооружения, лет	8	8	8*
Срок службы АЭС, лет	50	60	60

Примечание: * – включая объекты пристанционный ЯТЦ.

Совершенствование технологий атомной энергетики, улучшение технико-экономических показателей блоков с новым поколением реакторов ВВЭР, а также появление более эффективных и безопасных быстрых реакторов улучшат позиции АЭС в их конкуренции с традиционными для электроэнергетики России тепловыми электростанциями. В контексте перехода к низкоуглеродной электроэнергетике наиболее важной является конкуренция АЭС с современными парогазовыми электростанциями (ПГЭС), работающими при КПД 55% и выше. Сравнение новых газовых и атомных электростанций, выполненное на основе расчета их удельных дисконтированных затрат (аналогичных методоло-

гии IEA [3] и IAEA [4]), позволяет оценить стоимость производства электроэнергии на этих типах электростанций (табл. 4) и сделать следующие выводы:

– при существующем соотношении стоимости строительства ПГЭС и АЭС и ценах газа электроэнергия от новых атомных электростанций в районе ОЭС Центра оказывается почти в 1,5 раза дороже, чем от новых ПГЭС;

– при достижении целевых показателей ВВЭР-ТОИ и с учетом роста цен газа к 2035 г. удельные дисконтированные затраты ПГЭС и АЭС сравняются; дополнительные возможности удешевления стоимости электроэнергии от атомных электростанций за счет роста КИУМ

Таблица 4

Сравнительная эффективность новых парогазовых и атомных блоков, руб. 2015 г./кВт·ч

Технологии	2015 г.	2035 г.		
		Базовый	Рост КИУМ до 90%	Удешевление капитала на 2%
ПГЭС	2,15	2,50	–	2,35
АЭС-2006	3,28	–	–	–
ВВЭР-ТОИ	–	2,58	2,17	2,15
БР-1200	–	2,15	1,80	1,78

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

или удешевления капитала позволяют достичь уровня существующей цены производства электроэнергии на ПГЭС, то есть обеспечить равноэффективность газовой и атомной энергетики даже при существующем уровне цены газа;

– переход на новые технологии быстрых реакторов (БР-1200) позволит дополнительно снизить стоимость производства электроэнергии АЭС до уровня ПГЭС при существующих ценах газа и, таким образом, создать запас эффективности для атомной энергетики нового поколения, который также может быть увеличен за счет роста КИУМ или снижения стоимости капитала.

Возможности повышения конкурентоспособности возобновляемой энергетики

Развитие электростанций, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ, прежде всего – энергию ветра и Солнца), является доминирующей тенденцией в мировой электроэнергетике в последние 15-20 лет. Для многих стран развитие ВИЭ позволяет одновременно решить задачи энергетической безопасности (замещение местными ресурсами импортируемых энергоносителей), а также экологии (снижение выбросов не только парниковых газов, но и традиционных загрязнителей). Ярким примером является реализуемая в ЕС стратегия «20-20-20», предусматривающая вместе со снижением электроемкости на 20% увеличение доли ВИЭ до 20%, обеспечивая при этом снижение эмиссии ПГ на 20%. Вызовы энергобезопасности и экологии, хотя и в разных соотношениях, лежат в основе стратегических программ развития возобновляемой энергетики всех ведущих экономик мира, включая США и Китай.

Успешной реализации этих программ способствует ощутимый прогресс в развитии технологий возобновляемой энергетики, значительная часть которых уже находится в стадии массового тиражирования. Это отражается на кратном снижении стоимости ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанций за последние 10-15 лет. Так, например, по оценке IRENA [5], каждое удвоение мощности ветроэлектростанций обе-

спечивало снижение их стоимости в среднем на 7%. Прогнозные оценки (IEA, IRENA, и др.) с разной степенью оптимистичности предполагают, что снижение удельных капиталовложений для объектов возобновляемой энергетики продолжится, однако с затухающими темпами [6]. В наименьшей степени снизится стоимость наиболее «зрелых» технологий наземных ВЭС – не более 15% к 2030-2035 годам. В отличие от них технологии морских ВЭС еще только достигли пика капиталоемкости, и в следующие 10-20 лет их удельные капитальные затраты также будут сокращаться на 15-30%. Более высокие темпы удешевления сохраняются для СЭС – до 50% в ближайшие 15-20 лет. Соответствующие оценки капиталоемкости ВЭС и СЭС для России, с учетом существующих предельных нормативов стоимости строительства и прогнозного удешевления, приведены в табл. 5.

Важно отметить и то, что масштабное развитие ВИЭ-электростанций с нерегулируемым режимом работы сопровождается все возрастающими затратами на их интеграцию в электроэнергетическую систему (ЭЭС). Наряду с непосредственными затратами на их технологическое присоединение (которые зачастую включаются в тарифную базу самой сетевой компании), в ЭЭС реализуются комплексные мероприятия по усилению сетевой инфраструктуры, обеспечению дополнительного резервирования, повышению маневренности традиционных типов электростанций (включая даже угольные и атомные), изменяются режимы загрузки генерирующих мощностей с «размыванием» границ между базисными, маневренными и пиковыми источниками электроэнергии. Очевидно, что при обосновании масштабных программ развития ВИЭ (в том числе и в ЭЭС России) соответствующие капитальные и эксплуатационные затраты также должны интегрироваться в оценку эффективности технологий возобновляемой энергетики.

Другим вариантом интеграции ВИЭ в ЭЭС является обеспечение управляемой выдачи мощности с использованием накопителей электроэнергии, локализованных вблизи от источника. Такое комплексное решение позволяет избежать большинства технических проблем, связанных с

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Таблица 5

Сравнение капиталоемкости новых газовых, ветровых и солнечных электростанций, а также накопителей электроэнергии для выравнивания графика выдачи мощности ВИЭ-электростанций в ЭЭС, тыс. руб. 2015 г./кВт·ч

Технологии	2015 г.	2035 г.
Ветровая ЭС	110,0	95,7
Солнечная ЭС	114,1	57,1
Накопитель для ВИЭ	64,0	32,0
ПГЭС	50,1	45,1
ГТЭС	20,1	20,1

возмущениями от нерегулярной работы ВЭС и СЭС, однако перспективы его массового применения во многом зависят от темпов улучшения эксплуатационных характеристик накопителей (включая снижение деградации) и их удешевления. За последние три года стоимость аккумуляторных батарей для часовых интервалов работы снизилась примерно вдвое, как и стоимость остальных компонентов накопителя. Прогнозируется, что совершенствование существующих технологических решений позволит уменьшить стоимость батарей еще вдвое до 2025 г., а полная стоимость накопителей (с учетом остальной части оборудования) – сократится на 40-50% (табл. 5).

Оценка конкурентоспособности технологий возобновляемой энергетики для российских условий выполнена с учетом изменения удельных дисконтированных затрат на новые ВЭС и СЭС

в их сравнении с современной ПГЭС при прогнозируемом росте цен топлива. При этом для ВИЭ-электростанций дополнительно учтены дополнительные системные затраты на резервирование (газовыми турбинами) или управление выдачей мощности с помощью накопителей (АБ). Полученные результаты представлены в табл. 6, а их анализ позволяет сделать следующие выводы:

– при существующих соотношениях удельных капиталовложений и ценах топлива стоимость электроэнергии новых ветровых (ВЭС) и солнечных (СЭС) электростанций многократно превышает удельные дисконтированные затраты на ПГЭС, и это подтверждает тезис о гораздо более высоких экономических барьерах крупномасштабного развития ВИЭ-электростанций в России по сравнению с условиями в других

Таблица 6

Сравнительная эффективность новых парогазовых, ветровых и солнечных электростанций в Центральной России, руб. 2015 г./кВт·ч

Технологии	2015 г.	2035 г.	
		Базовый	Удешевление капитала на 5%
ПГЭС	2,15	2,50	2,00
ВЭС	7,03	4,98	3,42
То же с учетом резервирования (ГТУ)	8,86	6,45	4,54
То же с учетом регулирования (АБ)	13,00	8,04	5,69
СЭС	10,77	6,19	4,44
То же с учетом резервирования (ГТУ)	13,22	8,64	6,31
То же с учетом регулирования (АБ)	18,90	11,06	8,09

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

странах мира, активно реализующих сценарии перехода к низкоуглеродной энергетике на базе возобновляемых ресурсов;

– прогнозируемое удешевление ВИЭ-электростанций при одновременном удорожании электроэнергии от газовых электростанций (за счет роста цен топлива) заметно снизит разрыв в стоимости электроэнергии новых ПГЭС, ВЭС и СЭС, однако он все равно будет исчисляться не процентами, а кратностью (2-2,5 раза). При этом учет дополнительных затрат на резервирование увеличивает удельные дисконтированные затраты ВЭС и СЭС на 30-40%, а интеграция ВИЭ-электростанций с накопителями потребует еще большего роста стоимости электроэнергии на 60-80%. Можно сказать, что сопутствующие затраты на интеграцию объектов возобновляемой энергетики в энергосистему обнуляют весь эффект от улучшения стоимостных показателей этих технологий;

– в качестве существенной меры поддержки ВИЭ может рассматриваться резкое (с 10 до 5%) снижение стоимости капитала, однако и в этом случае электроэнергия от новых ВЭС и СЭС в

условиях России останется на 40-80% дороже, чем от ПГЭС, а с учетом дополнительных затрат на резервирование или на развитие накопителей разрыв в их стоимости остается кратным.

Роль АЭС в спектре инструментов для обеспечения низкоуглеродного развития электроэнергетики России

Полученные оценки стоимости электроэнергии от новых парогазовых, атомных, ветровых и солнечных электростанций позволяют проанализировать технологические приоритеты перехода к низкоуглеродной электроэнергетике России. Сводная характеристика изменения удельных дисконтированных затрат представлена в табл. 7, где все расчетные значения УДЗ приведены относительно цены электроэнергии новой ПГЭС при существующих условиях. Это позволяет исключить из анализа неопределенность роста цены газа, более наглядно оценив потенциал повышения конкурентоспособности атомной и возобновляемой энергетики за счет улучшения технологий, а также эффективность

Таблица 7

Изменение удельных дисконтированных затрат новых АЭС, ВЭС и СЭС относительно ПГЭС

Технологии	Изменение удельных дисконтированных затрат, отн. УДЗ ПГЭС 2015 г.			Стоимость дополнительного снижения эмиссии ПГ относительно ПГЭС, долл./кВт·ч		
	2015 г.	2035 г.		2015 г.	2035 г.	
		Базовый	Удешевление капитала		Базовый	Удешевление капитала
ПГЭС	1,00	1,16	-	-	-	-
АЭС-2006	1,53	-	-	34		
ВВЭР-ТОИ	-	1,20	0,86	-	4	-17
БР-1200	-	1,00	0,71	-	-17	-35
ВЭС	3,27	2,32	1,37	197	118	44
с учетом резервирования (ГТУ)	4,12	3,00	1,82	277	189	98
с учетом регулирования (АБ)	6,05	3,74	2,28	458	265	153
СЭС	5,01	2,88	1,78	360	176	93
с учетом резервирования (ГТУ)	6,15	4,02	2,52	467	294	182
с учетом регулирования (АБ)	8,79	5,14	3,24	715	409	267

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

мер специальной поддержки, обеспечивающих более низкую стоимость капитала.

Полученные результаты показывают, что улучшение существующих показателей АЭС на тепловых нейтронах (создание блока ВВЭР-ТОИ) позволяет заметно приблизиться к стоимости электроэнергии ПГЭС даже при существующем уровне цен газа, а с переходом на новое поколение быстрых реакторов стоимость газовой и атомной генерации сравнивается. Дополнительные меры поддержки, удешевляющие стоимость капитала для АЭС, позволят выйти на еще более низкий уровень стоимости электроэнергии (на 15-30% ниже, чем у ПГЭС в настоящее время). В то же время даже радикальное улучшение эффективности ВЭС и СЭС не обеспечивает снижения стоимости выработки электроэнергии до уровня ПГЭС, а с учетом дополнительных системных затрат этот разрыв остается кратным.

Применительно к экономическим условиям перехода к низкоуглеродной энергетике, данные различия в стоимости электроэнергии могут быть выражены и в дополнительной стоимости единицы снижения выбросов ПГ на новых АЭС и ВИЭ-электростанциях относительно ПГЭС. Такие оценки, также представленные в табл. 7, показывают, что развитие новых поколений АЭС оказывается сопоставимой с ПГЭС

альтернативой сдерживания эмиссии ПГ или даже более эффективной (отрицательные значения стоимости снижения выбросов), чем газовая генерация, особенно при удешевлении стоимости капитала. В отличие от атомной энергетики развитие возобновляемого сегмента отрасли является более дорогой альтернативой перехода к низкоуглеродному профилю отрасли, поскольку при этом минимальная величина дополнительной стоимости снижения эмиссии (против ПГЭС) составляет более 40 долл./т CO₂ для ВЭС и более 90 долл./т CO₂ для СЭС. Исключение специальных мер поддержки, а также учет дополнительных затрат на резервирование или аккумулятирование увеличивает эти значения в 2-3 раза.

Рассмотренные выше результаты и оценки показывают специфику условий межтопливной конкуренции в электроэнергетике России. Относительно низкие цены газа и значительный технологический потенциал для повышения эффективности АЭС заметно ограничивают экономический потенциал развития возобновляемой энергетики (даже с учетом разумного уровня поддержки), но создают новые возможности для более активного развития атомной энергетики, в том числе как важного инструмента национальной климатической политики.

ЛИТЕРАТУРА

1. ВВЭР-ТОИ: водо-водяной реактор 3.0. // Атомный эксперт, 2013, № 1-2. С. 22-29.
2. Адамов Е.О., Каширский А.А., Муравьев Е.В., Толстоухов Д.А. Структура и параметры двухкомпонентной ядерной энергетики при переходе к замыканию ядерного топливного цикла // Известия РАН. Энергетика, 2016, № 5. С. 14-32.
3. Projected Costs of Generating Electricity. OECD/IEA, 2015.
4. Economic evaluation of bids for nuclear power plants – 1999 ed. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000. (Technical reports series, ISSN 0074-1914; no. 396), STI/DOC/010/396.
5. IRENA Renewable cost database. The power to change: solar and wind cost reduction potential to 2025. IRENA, 2016.
6. Прогноз развития энергетики мира и России 2016 / под ред. Макарова А.А., Григорьева Л.М., Митровой Т.А. М.: ИНЭИ РАН-АЦ при Правительстве РФ, 2016. 200 с.

Поступила в редакцию
24.05.2017 г.

F.V. Veselov, A.S. Makarova, T.V. Novikova, D.A. Tolstoukhov, P.V. Atnyukova²

NPP COMPETITIVE PROSPECTS AS TO DEVELOPING LOW CARBON PROFILE OF RUSSIAN ENERGY INDUSTRY

The article covers the opportunities for switching to the low-carbon development scenarios of the Russian energy industry under growing environmental challenges. The economic comparison of modern highly economical technologies such as gas generation, nuclear and renewable energy (taking into account accompanying systemic effects) was made to evaluate opportunities for such a switch-over while leveraging the nuclear industry potential in Russia with account of its changing competitiveness and the cost per unit of CO₂ emission reduction.

Key words: power generation, nuclear power, renewable energy, greenhouse gases, economic efficiency.

² Fedor V. Veselov – Head of Department at the Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (ERI RAS), PhD in Economics, *e-mail:* erifedor@mail.ru;

Alla S. Makarova – Leading Researcher at the ERI RAS, PhD in Economics, *e-mail:* alla@eriras.ru;

Tatyana V. Novikova – Researcher at the ERI RAS, PhD in Economics, *e-mail:* ntv@eriras.ru;

Dmitry A. Tolstoukhov – Chief Economist of the Proryv Project – the Innovation and Technology Center of the State Atomic Energy Corporation Rosatom, PhD in Engineering, *e-mail:* tda@proryv2020.ru;

Polina V. Atnyukova – Leading Economist at the Chief Economist Department of the Proryv Project – the Innovation and Technology Center of the State Atomic Energy Corporation Rosatom, PhD in Economics, *e-mail:* apv@proryv2020.ru

УДК 621.311.25:629.039 (100)

Б.И. Нигматулин¹

ПРОГНОЗ МИРОВОГО ЭЛЕКТРОПРОИЗВОДСТВА НА АЭС НА 2015-2050 ГОДЫ

В статье представлен прогноз электропроизводства в мире на период 2015-2050 гг., рассчитанный на базе среднегодового коэффициента эластичности электропотребления к численности населения (Кэл) и прогноза роста численности населения ООН до 2050 года. Разработан прогноз роста суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире к 2050 г.: по базовому сценарию – до 456 ГВт, по оптимистичному – до 600 ГВт. Показано, что при оптимистичном прогнозе роста мирового электропроизводства на АЭС (действующих на 01.01.2015 г.) извлекаемых запасов природного урана (с себестоимостью добычи 260 долл./ кг) хватит до 2100 года.

Ключевые слова: мировое электропроизводство, электропроизводство на АЭС, динамика электропотребления, динамика численности населения, коэффициент эластичности.

Прогноз мирового электропроизводства на АЭС на долгосрочный период 2015-2050 гг. является составной частью прогноза общего мирового электропроизводства на всех типах энергоустановок. В свою очередь, собственно прогноз общего мирового электропроизводства определяется прогнозами мирового электропотребления и электрическими потерями.

Прогноз мирового электропотребления является производной от прогноза развития мировой экономики, то есть прогнозов темпов роста мирового ВВП и его структуры. В свою очередь, они определяются темпами роста численности населения Земли, ростом его благосостояния, развитием технологий, эффективностью производства и многим другим.

Прогноз динамики электропотребления в мире на 2015-2050 гг.

В основу прогноза мирового электропотребления на 30-35 лет (до 2050 г.) заложена естественная макроэкономическая связь между темпами роста электропотребления и численности населения. Для расчета такого прогноза необходимо определить ежегодные, а по ним среднегодовой коэффициент эластичности электропотребления к численности населения (Кэл) в предшествующие 35-40 лет, то есть в 1975-2015 годы. Кроме того, использовать наиболее обоснованный прогноз роста численности населения на период до 1950 года.

На рис. 1 показана динамика роста: численности населения Земли (млрд человек), мирового электропотребления (трлн кВт·ч), а также мирового ВВП и инвестиций в основной капитал (ИОК) (в постоянных ценах, в долл. 2010 г.) в период 1970-2015 гг. (46 лет).

Из рис. 1 видно, что в период 1970-2015 гг. (46 лет) численность населения Земли увеличилась с 3,7 до 7,35 млрд человек, или в 2 раза, при этом мировое электропотребление увеличилось с 4,4 до 19,9 трлн кВт·ч, или 4,5 раза, мировой ВВП с 18,9 до 74,6 трлн долл., или в 3,9 раза, и мировые ИОК с 4,44 до 18 трлн долл., или в 4,1 раза.

Интересно отметить, что в 2015 г. доля мировых ИОК в мировом ВВП равнялась $0,24 = 18 \text{ трлн долл.} / 74,6 \text{ трлн долл.}$. Для справки: в России эта доля несколько меньше – 0,19, что показывает существенный недостаток ИОК в экономике такой индустриально развивающейся страны, как Россия.

На рис. 2 показаны ежегодные темпы изменения мирового электропотребления и численности населения Земли в 1970-2015 годы.

Из рис. 2 видно, что в период 1971-2015 гг. (45 лет) ежегодный темп роста численности населения снизился с 2,1 до 1,2%, при этом среднегодовой темп мирового электропотребления изменялся с 7,9 (1970-1974 гг.) до 3,0% (2010-2015 гг.).

На рис. 3 показаны значения ежегодного коэффициента эластичности (с локальным осред-

¹ Булат Искандерович Нигматулин – генеральный директор Института проблем энергетики, советник вице-президента по маркетингу и развитию бизнеса «Русатом Оверсиз», д.т.н., профессор, e-mail: nb@geotar.ru

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

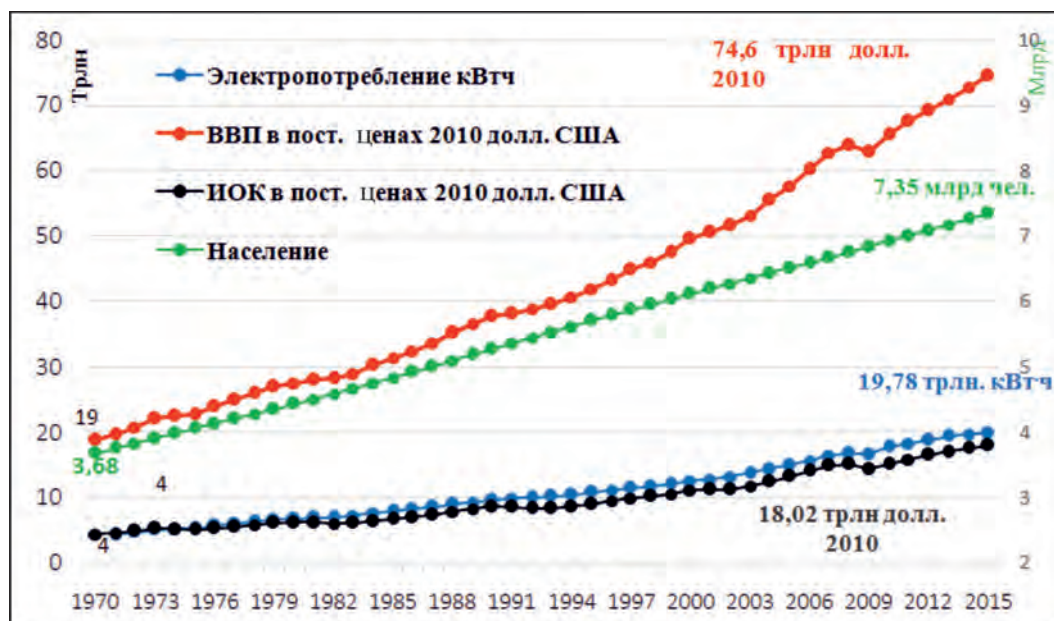


Рис. 1. Динамика роста численности населения Земли (млрд человек), мирового электропотребления (трлн кВт·ч), а также мирового ВВП и инвестиций в основной капитал

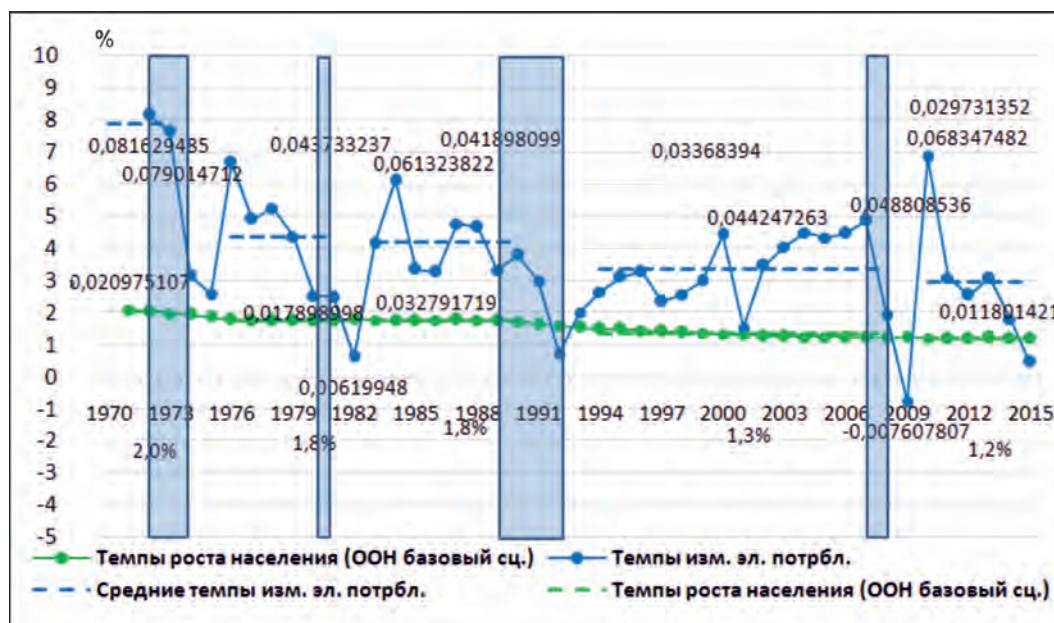


Рис. 2. Ежегодные темпы изменения мирового электропотребления и численность населения Земли в 1970-2015 гг.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

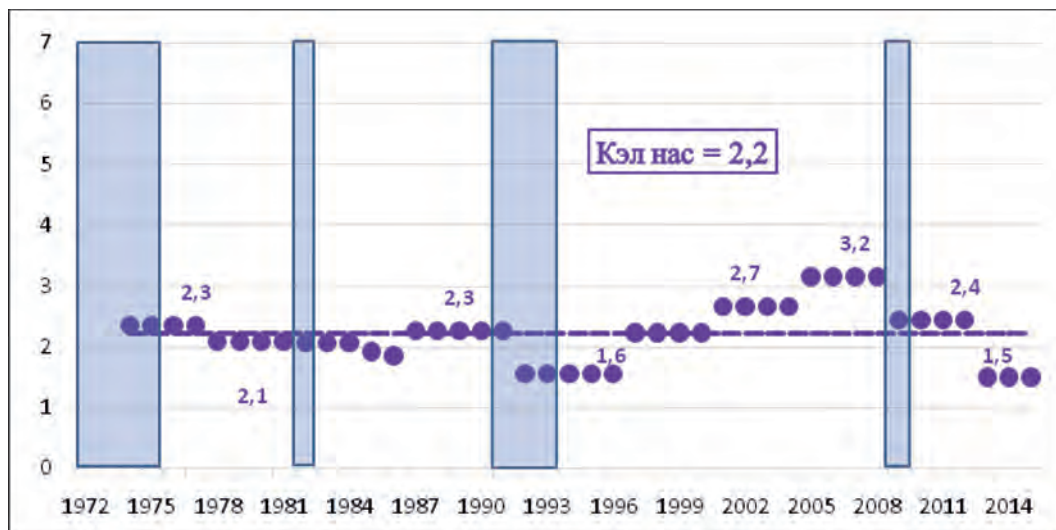


Рис. 3. Ежегодный коэффициент эластичности (с локальным осреднением в диапазоне 2-4 года) мирового электропотребления к численности населения Земли в период 1971-2015 гг.

нением) мирового электропотребления к численности населения Земли в период 1971-2015 годов.

Из рис. 3 видно, что значение годового коэффициента эластичности (с локальным осреднением) энергопотребления к численности населения (Кэл)н изменяется от 3,2 до 1,5. При этом на всем периоде 1973-2015 гг. (43 года) среднегодовое значение коэффициента эластичности (Кэл)н = 2,22. Это значит, что в этот период на 1% роста численности населения Земли в среднем приходилось 2,22% роста мирового элек-

тропотребления. Примем значение (Кэл)н = 2,22 (оценка сверху) и в период 2016-2050 гг. (35 лет).

Рост численности населения Земли и соответствующие ему годовые темпы роста достаточно обоснованно рассчитываются по демографическим программам для различных стран ООН (базовый сценарий, рис. 4).

Из рис. 4 видно, что в период 2016-2050 гг. численность населения Земли увеличилась с 7,4 до 9,7 млрд человек, или на 31%. При этом ежегодный темп роста населения Земли упал почти в 2 раза, с 1,17 до 0,54%. В рассматриваемом под-

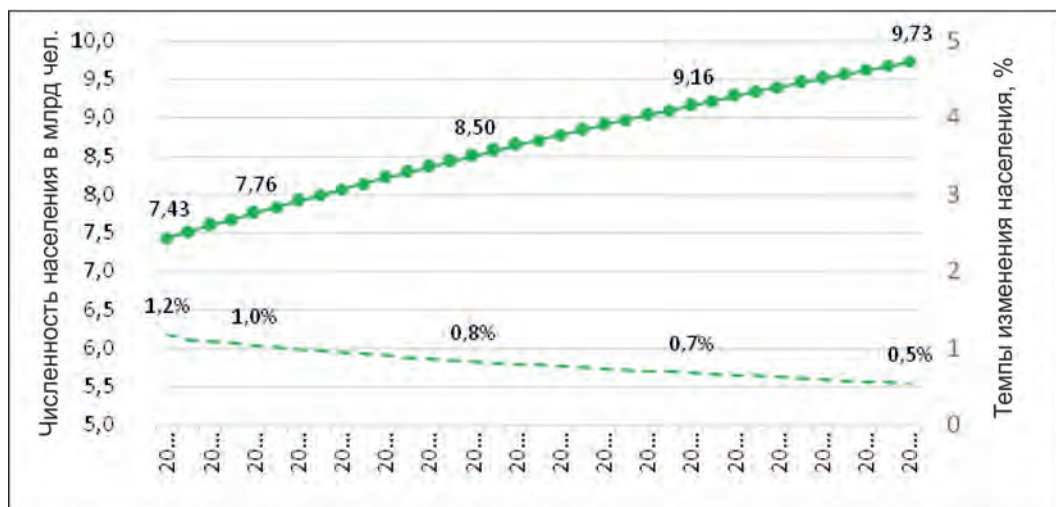


Рис. 4. Прогнозы динамики численности населения Земли и соответствующие ей годовые темпы роста в период 2016-2050 гг. [1]

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

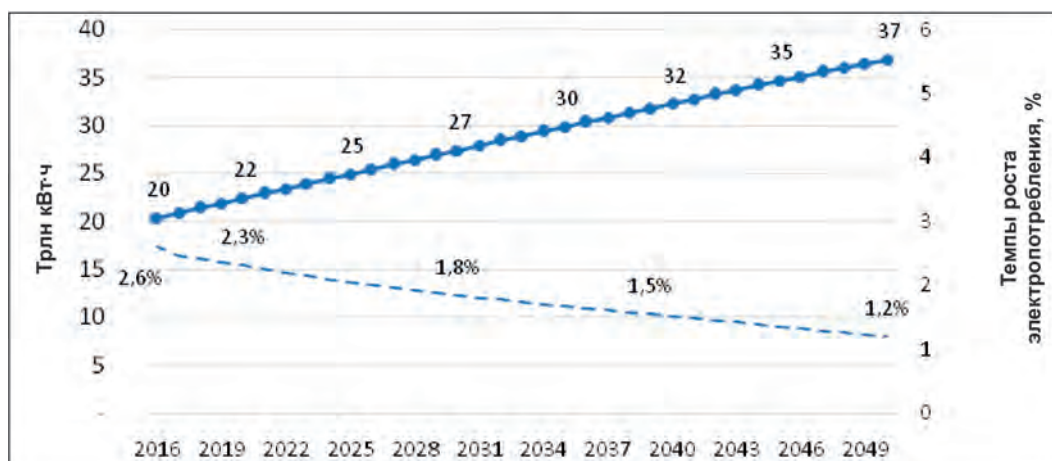


Рис. 5. Прогнозы ежегодных темпов роста мирового электропотребления и его динамика, рассчитанная на основе этих темпов, в период 2016-2050 гг.

ходе, в период 2016-2050 гг., ежегодные темпы роста мирового электропотребления равняются ежегодным темпам роста населения земли, умноженным на $(K_{эл})_н = 2,22$.

На рис. 5 показаны прогнозы ежегодных темпов роста мирового электропотребления и его динамика, рассчитанная на основе этих темпов, в период 2016-2050 годов.

Из рис. 5 видно, что в период 2016-2050 гг. (35 лет), в соответствии с настоящим прогнозом, ежегодный темп роста мирового электропотребления снижается с 2,6 до 1,19%. При этом миро-

вое электропотребление увеличивается с 20,4 до 36,9 трлн кВт·ч., или в 1,8 раза.

Прогноз динамики производства электроэнергии в мире в период 2015-2050 гг.

Электричество – такой вид энергии, который потребляется в момент его производства. Пока его невозможно аккумулировать в заметных объемах. Поэтому объем электропроизводства представляет собой сумму объемов электропотребления и электрических потерь, то есть

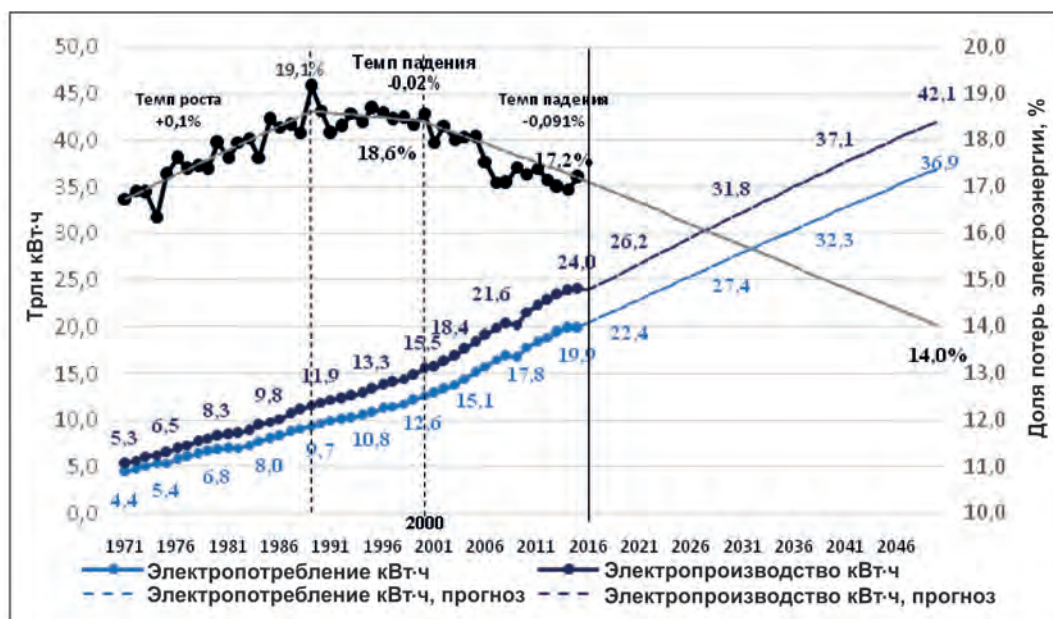


Рис. 6. Динамика мирового электропотребления, электропроизводства и потерь электроэнергии в период 1970-2015 гг. (факт) и их прогнозные значения в период 2016-2050 гг.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

потерь электроэнергии от места производства до места потребления. В эти потери входят: затраты электроэнергии на собственные нужды генерирующих мощностей (производителя электроэнергии), потери в магистральных и распределительных сетях, а также несанкционированный отбор электроэнергии.

На рис. 6 показана динамика мирового электропотребления, электропроизводства и потерь электроэнергии в период 1970-2015 гг. (факт) и их прогнозные значения в период 2016-2050 годов.

Из рис. 6 видно, что в период 1971-2015 гг. (45 лет) объем мирового электропотребления увеличился в 4,5 раза (с 4,4 до 19,9 трлн кВт·ч), а электропроизводство в 4,6 раза (с 5,3 до 24,0 трлн кВт·ч). При этом в период 1971-1989 гг. доля потерь электроэнергии от объема электропроизводства увеличилась с 16,7 до 19,1%. Далее эта доля находилась примерно на одном уровне, а в период 2000-2015 гг. она снижалась с 18,6 до 17,2% со среднегодовым темпом – 0,09%.

В период 2015-2050 гг. для определения прогнозных значений мирового электропроизводства принималось продолжение линейного тренда снижения доли потерь электроэнергии со среднегодовым темпом -0,091%, как в предшествующем периоде 2000-2015 годов. В этом случае потери электроэнергии снижаются линейно с 17,2 (2015 г.) до 14,0% (2050 г.). Из рис. 6 также видно, что в период 2016-2050 гг. мировое электропроизводство увеличилось с 24,0 до 42,1 трлн кВт·ч, или в 1,75 раза, со среднегодовым темпом 1,7%.

В недавно опубликованной работе [3], подготовленной Economics & Technology Research Institute китайской нефтегазовой корпорации CNPC, приводится динамика мирового электропроизводства и его структура в период 1990-2014 гг. и их прогнозы на 2015-2050 годы.

На рис. 7 показаны динамика мирового электропроизводства и его структура в период 1990-2015 гг. (факт.) и их прогнозы в период 2016-2050 гг., по данным настоящей работы (только динамика мирового электропроизводства) и CNPC ETRI 2016 [3].

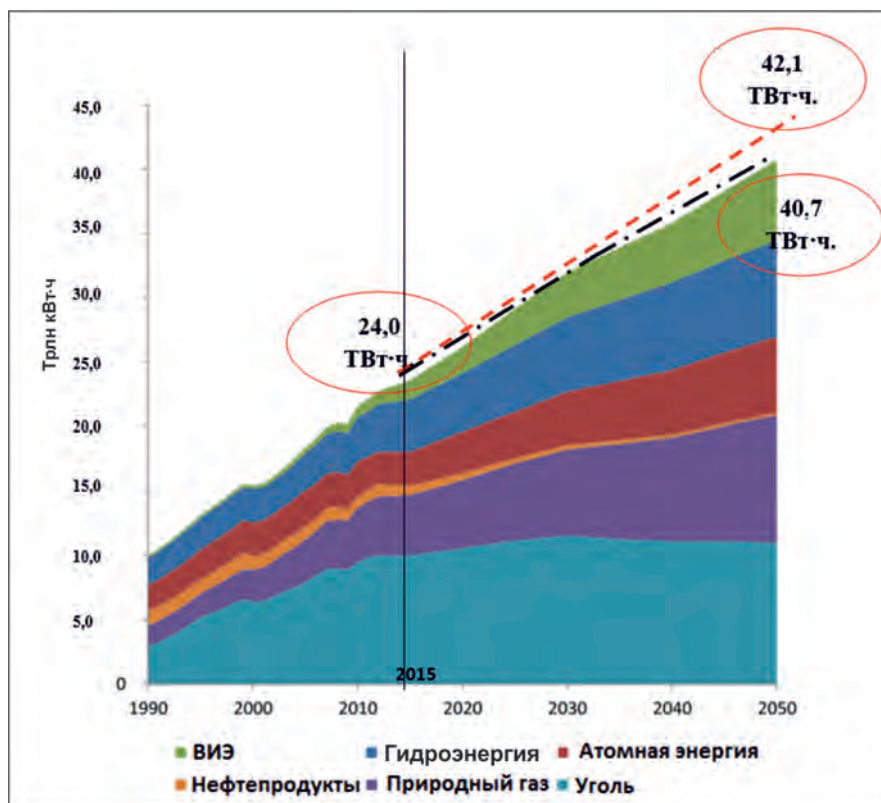


Рис. 7. Динамика мирового электропроизводства и его структуры в период 1990-2015 гг. (факт.) и их прогнозы в период 2016-2050 гг., по данным настоящей работы (только динамика мирового электропроизводства) и [3]

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

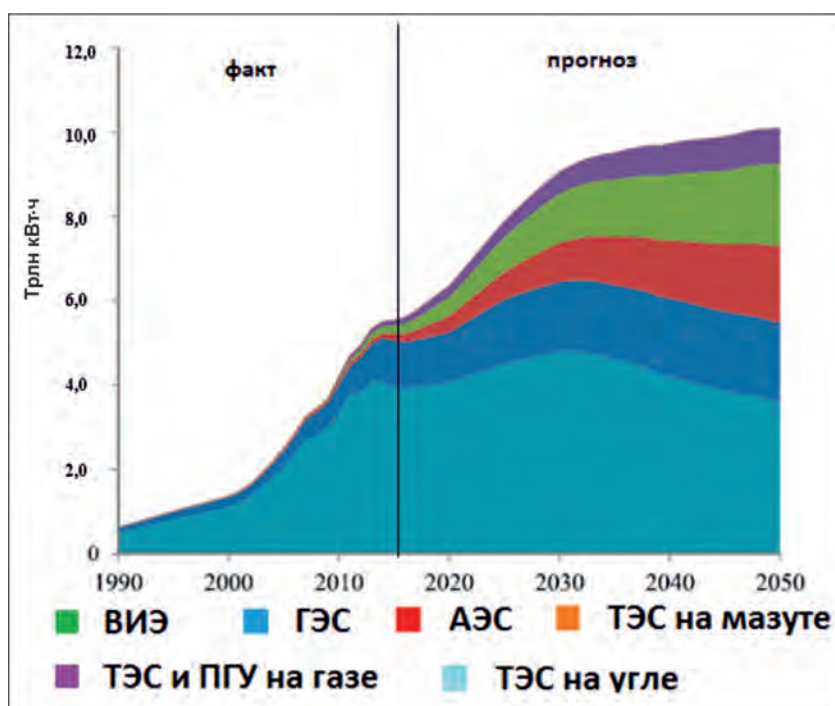


Рис. 8. Динамика и структура электропроизводства в Китае в 1990-2014 гг. (факт.) и в 2015-2050 гг. (базовый прогноз)

Из рис. 8 видно, что в Китае в 2014 г. объем электропроизводства составил 5,5 трлн кВт·ч, или около 4000 кВт·ч на человека. Для справки: в России в 2015 г. объем электропроизводства составил 7100 кВт·ч на человека.

В Китае, по прогнозу, доля электропроизводства на АЭС растет почти линейно с 2,3% в 2014 г. до 18,1% в 2050 году. Это значит, что в 2050 г. объем электропроизводства на АЭС составит 1,81 трлн кВт·ч, или 18,1% от общей выработки. Энергоблок АЭС мощностью 1 ГВт (эл.) при КИУМ = 84% (среднемировой уровень) производит 7,36 млрд кВт·ч в год. Это значит, что в Китае в 2050 г. установленная мощность АЭС должна составить 246 ГВт (эл.) = 1,81 трлн кВт·ч / 7,36 млрд кВт·ч.

Прогноз роста суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире в период 2015-2050 гг.

Сохранение или даже некоторое снижение спроса на электроэнергию в ряде развитых стран (США, ОЭСР), установление низкой цены природного газа и связанной с ней низкой цены энергетического угля в США, в 2009-

2014 гг., а затем в Европе и во всем мире, конкуренция со стороны субсидируемых государствами ВИЭ ограничивают инвестиции в капиталоемкие проекты строительства АЭС с длительным сроком одобрения регулирующими органами. В результате развитие атомной энергетики в этих странах существенно усложняется, особенно на либерализованных электроэнергетических рынках.

Ситуацию усугубила также тяжелая авария на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г., произошедшая через 25 лет после аварии на Чернобыльской АЭС. По масштабу воздействия на окружающую среду она оказалась на порядок меньше, чем авария на ЧАЭС. Однако по воздействию на общественное мнение, стала сопоставима с аварией на ЧАЭС. Поэтому этой аварии был присвоен самый высокий уровень 7, такой же, как и аварии на ЧАЭС. В результате авария на АЭС «Фукусима-1», по самым оптимистичным сценариям, затормозит минимум на 10-15 лет начало возможного массового строительства энергоблоков АЭС в мире (кроме Китая). Соответственно их подключение к сети будет сдвинуто на 15-20 лет.

В США программа развития атомной энергетики базируется главным образом на продлении

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

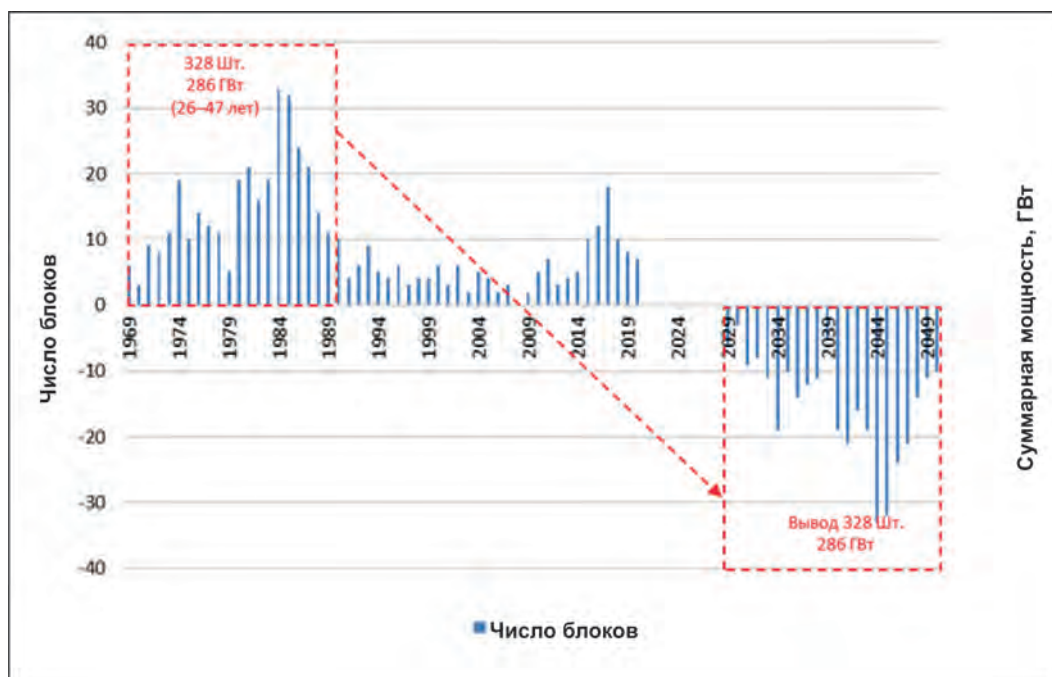


Рис. 9. Количество энергоблоков, выводимых из эксплуатации, и их суммарная мощность в период 2029-2050 гг.

эксплуатации действующих энергоблоков АЭС до максимально возможного предельного срока – 60 и более лет. По экономическим соображениям не планируется массовое строительство новых энергоблоков АЭС, как это было в 70-80-х годах прошлого века.

Германия, Бельгия, Швейцария отказались от продолжения развития атомной энергетики. Во Франции планируется сокращение с 75 до 50% доли производства электроэнергии на АЭС. В Японии объем производства электроэнергии на АЭС уже никогда не вернется к уровню до аварии на АЭС «Фукусима-1». В России и Великобритании планируется ограниченное строительство новых энергоблоков АЭС для замещения выводимых из эксплуатации.

Массовое строительство АЭС в мире, кроме Китая, можно ожидать в крупных и средних по размеру (экономик) развивающихся странах, имеющих дефицит ископаемых энергоресурсов, или программы замещения «грязных» энергоисточников (в первую очередь угольные ТЭС) на «чистые», куда входит и атомная энергетика.

При разработке прогноза динамики установленных мощностей энергоблоков АЭС, подключенных к сети в период 2016-2050 гг., необходимо учитывать суммарную мощность энергоблоков

АЭС по годам, достигших предельного срока службы 60 лет, которые должны быть выведены из эксплуатации в этот период. На рис. 9 показано количество энергоблоков, выводимых из эксплуатации, и их суммарная мощность в период 2029-2050 годов.

Из рис. 9 видно, что все энергоблоки АЭС, подключенные к сети с 1969-1989 гг. (328 блоков, суммарной мощностью 286 ГВт) должны быть выведены из эксплуатации в период 2029-2050 гг. (если они не были выведены из эксплуатации ранее), так как в этот период эти энергоблоки достигнут предельного срока эксплуатации – 60 лет. Оценки показывают, что примерно 40-45 энергоблоков АЭС суммарной мощностью 35 ГВт были выведены ранее 60-тилетнего срока эксплуатации.

В мире в период 2016-2020 гг. запланировано начать строительство 56-ти энергоблоков АЭС, суммарной мощностью 56 ГВт, из которых в Китае будет начато строительство 23-х энергоблоков АЭС, суммарной мощностью 26 ГВт. Отсюда следует, что мощность строящихся энергоблоков АЭС в мире по отношению к мощности строящихся китайских энергоблоков АЭС составляет соотношение: 54/46.

Для прямой экстраполяции этой пропорции на период 2021-2050 гг. требуется дополнитель-

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

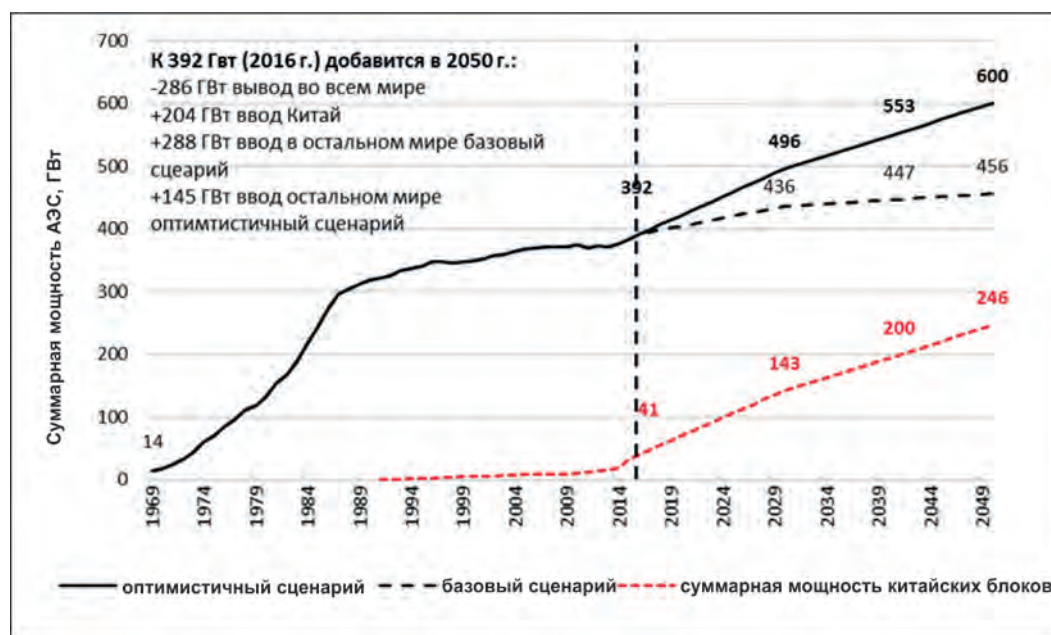


Рис. 10. Рост суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире и отдельно в Китае в период 1969-2015 гг. (факт.) и в период 2016-2050 гг. в соответствии базовым и оптимистичным прогнозами настоящей работы и прогноз роста суммарной установленной мощности АЭС в Китае, по данным [3]

ное обоснование, так как в этот период существуют большие неопределенности для начала строительства энергоблоков АЭС в других странах мира по сравнению с Китаем.

В сценарных условиях, при разработке прогноза роста суммарной мощности энергоблоков АЭС, подключаемых к сети в период 2016-2050 гг., учитываются следующие обстоятельства:

- мощность энергоблоков АЭС по годам, достигших предельного срока 60 лет, которые должны быть выведены из эксплуатации. Суммарная мощность таких энергоблоков составляет 286 ГВт к 2050 г. (оценка снизу);

- мощность энергоблоков АЭС, подключаемых к сети в Китае, принимается в соответствии с базовым прогнозом электропроизводства на АЭС в этой стране и в предположении, что средневзвешенный КИУМ АЭС равняется 0,84 – (среднемировой до аварии на АЭС «Фукусима-1»);

- ограниченное развитие атомной энергетики в мире (кроме Китая) из-за отсутствия роста электропотребления в развитых странах, ограниченных инвестиционных возможностей в развивающихся странах, конкуренции ВИЭ и ТЭС на природном газе, прогнозируемой долговре-

менной низкой цены на газ, постфукусимского синдрома, ограничения мощностей по производству энергетического оборудования для АЭС в Китае, Южной Корее и России – основных стран-экспортеров АЭ;

- ненулевая вероятность очередной тяжелой аварии на АЭС в мире.

Ниже рассматриваются два сценария.

Оптимистичный: предполагается, что суммарная установленная мощность энергоблоков АЭС, подключаемых к сети в мире (кроме Китая), и аналогичная мощность в Китае в период 2021-2050 гг. будет соответствовать пропорции 54/46. Это значит, что в мире по годам эта мощность будет составлять 117% от аналогичной мощности в Китае, или 288 ГВт в 2050 г. (оценка сверху).

Базовый: предполагается, что суммарная установленная мощность энергоблоков АЭС, подключаемых к сети в мире (кроме Китая), в период 2021-2050 гг. равняется 59% = 117% / 2 от аналогичной мощности в Китае, или 145 ГВт в 2050 годах.

На рис. 10 показан рост суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире и отдельно в Китае в период 1969-2015 гг. (факт.) и

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

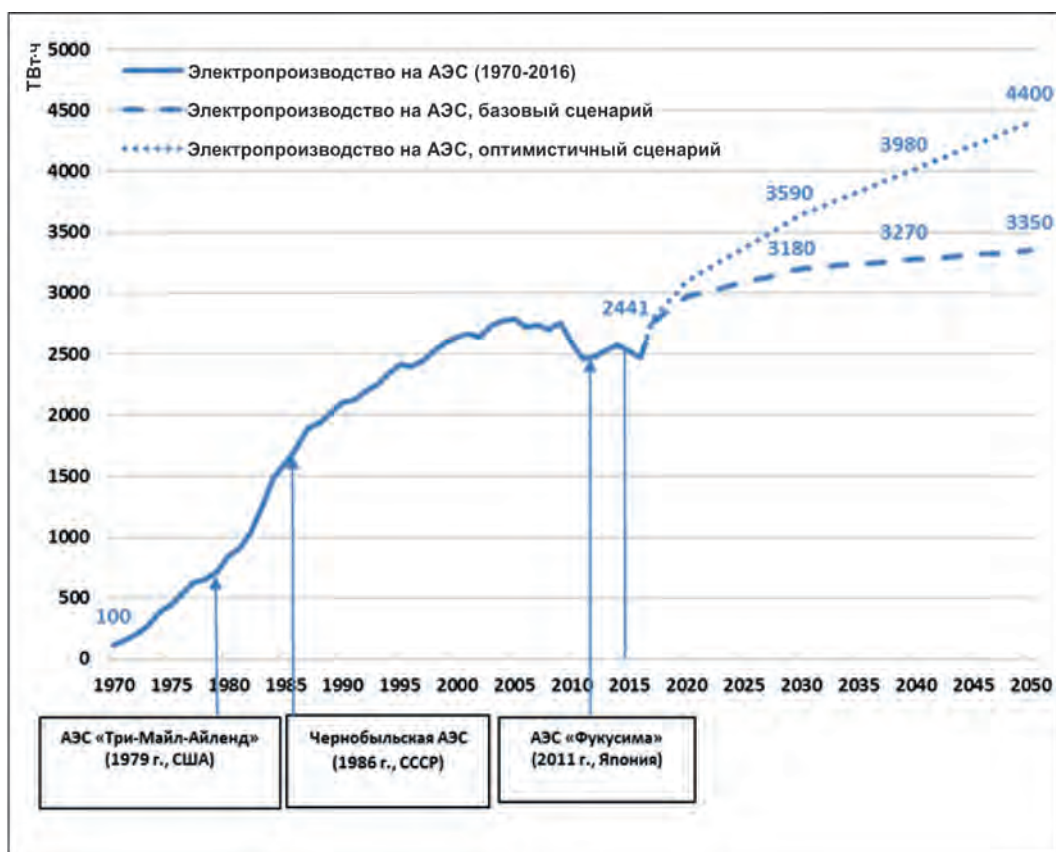


Рис. 11. Динамика мирового электропроизводства на АЭС в период 1970-2015 гг. (факт, по данным [5]) и прогнозы (базовый и оптимистичный), рассчитанные по данным настоящей работы

прогноз на период 2016-2050 гг. в соответствии с этими двумя сценариями.

Из рис. 10 видно, что по базовому прогнозу роста суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире сохраняется примерно тот же темп, который имел место в период 1987-2015 гг., при этом в 2050 г. она будет равняться 456 ГВт, и по сравнению с 2015 г. вырастет всего на 16%.

По оптимистичному (максимально возможному) сценарию темп роста суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире увеличится приблизительно в 3 раза по отношению к базовому и в 2050 г. эта мощность будет равняться 600 ГВт, и по сравнению с 2015 г. вырастет на 53%.

Рост суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в Китае соответствует базовому прогнозу, рассчитанному по данным [3]. В период 2016-2050 гг. эта мощность вырастет с 32 до 246 ГВт, или в 7,7 раз (оценка сверху).

Прогноз роста мирового электропроизводства на АЭС в период 2015-2050 гг.

На рис. 11 показана динамика мирового электропроизводства на АЭС в период 1970-2015 гг. (факт, по данным [5]) и прогнозы (базовый и оптимистичный), рассчитанные по данным настоящей работы.

Из рис. 11 видно, что по базовому сценарию мировое электропроизводство на АЭС увеличится с 2,63 (2016 г.) до 3,35 трлн КВт·ч (2050 г.), или на 27%, а по оптимистичному сценарию с 2,63 (2016 г.) до 4,4 трлн КВт·ч (2050 г.), или на 67%.

На рис. 12 показана доля мирового электропроизводства на АЭС от общего объема электропроизводства в мире в период 1971-2015 гг. (факт.) и в период 2016-2050 гг. (прогнозы: данные настоящей работы (базовый и оптимистичный) и по [3] (базовый).

Из рис. 12 видно, что в период 2016-2050 гг. доля мирового электропроизводства на АЭС от

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

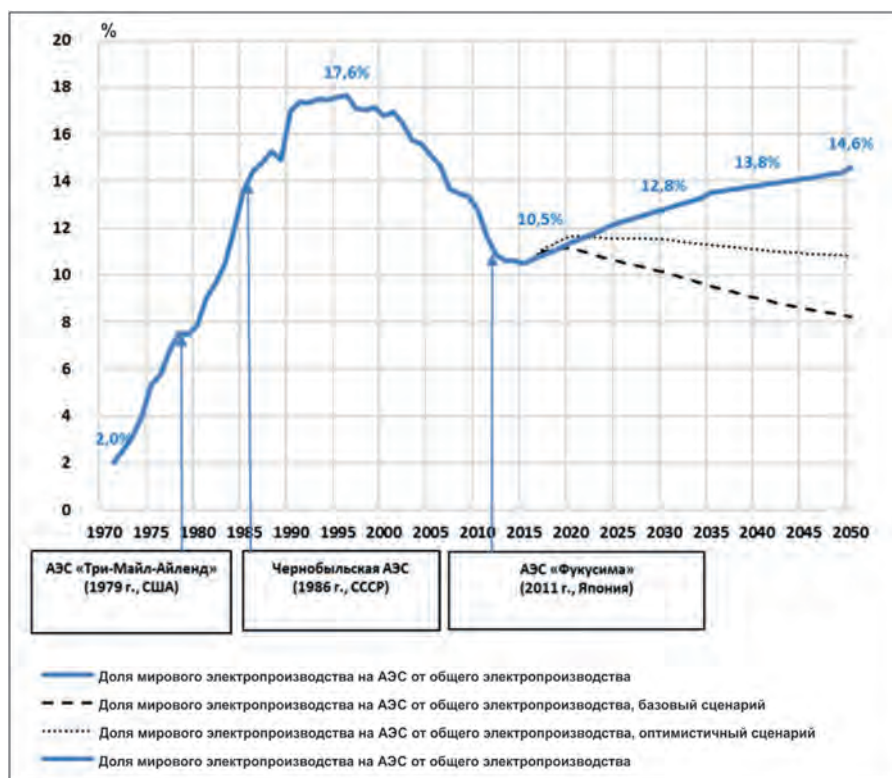


Рис. 12. Доля мирового электропроизводства на АЭС от общего объема электропроизводства в мире в период 1971-2015 гг. (факт.) и в период 2016-2050 гг.

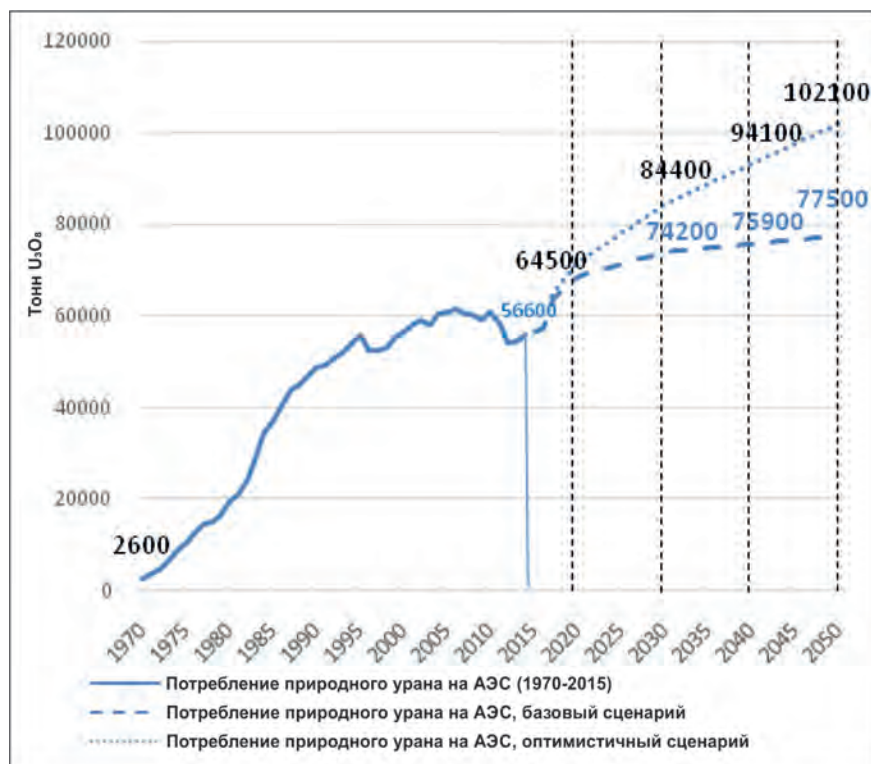


Рис. 13. Динамика потребления природного урана, соответствующая динамике мирового электропроизводства на АЭС в 1970-2015 гг. (факт.), и прогноз на 2016-2050 гг. в соответствии с базовым и оптимистичным прогнозами настоящей работы

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

общего объема электропроизводства в мире по базовому прогнозу настоящей работы падает с 10,5% (2015 г.) до 8,2% (2050 г.), а по оптимистичному – практически остается на постоянном уровне – 10,5-10,8% весь прогнозный период. Прогнозы настоящей работы заметно ниже базового прогноза [3], где эта доля возрастает с 10,5% (2015 г.) до 14,6% (2050 год).

Прогнозы роста мирового потребления урана на 2015-2050 гг.

В мире в 2014 г. на АЭС было произведено 2410 млрд кВт·ч электроэнергии, для этого потребовалось 56,6 тыс. т природного урана (U_3O_8). Отсюда следует, что на 1 кВт·ч электроэнергии, произведенной на АЭС в мире, в среднем было затрачено $0,0235 \cdot 10^{-3}$ кг $U_3O_8 = 56,6 \cdot 106$ кг $U/2,41 \cdot 10^{12}$ кВт·ч. Тогда, по прогнозу динамики мирового электропроизводства на АЭС в период 2016-2050 гг. (рис. 11), можно рассчитать прогноз динамики потребления природного урана в этот же период.

На рис. 13 показана динамика потребления природного урана, соответствующая динамике

мирового электропроизводства на АЭС в 1970-2015 гг. (факт.), и прогноз на 2016-2050 гг. в соответствии с базовым и оптимистичным прогнозами настоящей работы.

Из рис. 13 видно, что в соответствии с прогнозами настоящей работы по росту мирового электропроизводства на АЭС в 2015-2050 гг. получается: по базовому прогнозу потребление природного урана растет с 56,6 тыс. т (2015 г.) до 78 тыс. т в 2050 г., или на 38%. По оптимистическому прогнозу – до 102,1 тыс. т (2050 г.), или на 80%.

На рис. 14 показан рост разведанных извлекаемых запасов природного урана в зависимости от себестоимости его добычи в период 1975-2013 гг. [4].

Из рис. 14 видно, что есть тренд к росту разведанных извлекаемых запасов природного урана, так в период 1975-2013 гг. они увеличились с 1,5 до 2,1 млн т с себестоимостью добычи меньше 80 долл. за кг (U_3O_8), с 2,5 до 5,7 млн т с себестоимостью добычи менее 130 долл. за кг (U_3O_8) и до 7,6 млн т с себестоимостью добычи менее 260 долл. за кг (U_3O_8).

Рост разведанных извлекаемых запасов природного урана прямо связан с увеличением за-

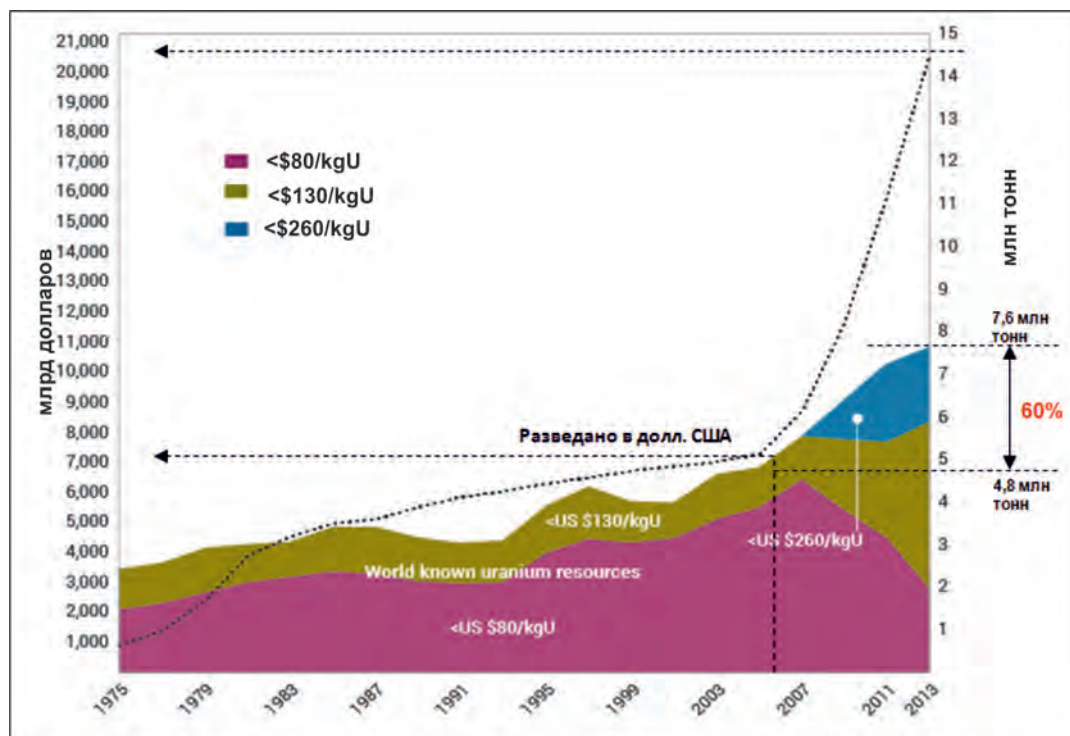


Рис. 14. Рост разведанных извлекаемых запасов природного урана в зависимости от себестоимости добычи в период 1975-2013 гг.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

трат как на геологоразведку урана, так и оценку его запасов на разведанных месторождениях. Так, в период 2004-2013 гг. на эти цели было потрачено более 14 млрд долларов. В этот период извлекаемые запасы урана с себестоимостью добычи менее 130 долл./кг увеличились с 4,8 до 5,7 млн т, или на 19%. В период 2007-2013 гг. эти запасы увеличились с 5,5 до 7,6 млн т, или на 38%, с себестоимостью добычи менее 260 долл./кг. По данным [4], на 01.01.2015 г. объем разведанных извлекаемых запасов природного урана в мире составляет 5,72 и 7,64 млн т с себестоимостью добычи, соответственно, менее 130 долл./кг и менее 260 долл./кг.

Можно рассчитать минимальный период времени, на который хватит имеющихся (на 01.01.2015 г.) разведанных извлекаемых запасов природного урана при оптимистичном (максимальном) прогнозе роста электропроизводства

на энергоблоках АЭС, рассмотренном в настоящей работе.

В 2016-2050 гг. (35 лет) среднегодовое потребление урана составит 2,84 млн т = 81 тыс. т х 35 лет. Тогда оставшийся объем извлекаемых запасов природного урана равняется 2,88 млн т = 5,72 млн т – 2,84 млн т (с себестоимостью добычи менее 130 долл./кг) и 4,8 млн т = 7,64 млн т – 2,84 млн т (с себестоимостью добычи менее 260 долл./кг). Таким образом, оставшихся запасов хватит на 28 лет = 2,88 млн т / 102,6 тыс. т в год (с себестоимостью добычи менее 130 долл./кг) и 47 лет = 4,8 млн т / 102,6 тыс. т в год (с себестоимостью добычи менее 260 долл./кг).

Итого: на 63 года = 35 лет + 28 лет с себестоимостью добычи менее 130 долл./кг и на 82 года = 35 лет + 47 лет с себестоимостью добычи менее 260 долл./кг., и это без учета роста разведанных извлекаемых запасов природного урана после 01.01.2015 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. UN: *World Population Prospects: The 2015 Revision*.
2. CNPC *World Energy Outlook 2050*.
3. *World and China Energy Outlook 2050*, CNPC ETRI 2016.
4. OECD NEA & IAEA, *Uranium 2016: Resources, Production and Demand (Red Book)*
5. Enerdata.

Поступила в редакцию
17.05.2017 г.

B.I. Nigmatulin²

FORECAST OF GLOBAL ELECTRICITY PRODUCTION AT NUCLEAR POWER PLANTS FOR 2015-2050

The article provides a global electricity production forecast for the 2015-2050 period calculated based on the annual average elasticity coefficient of electricity consumption to the population size (Kel) and the UN population growth forecast until 2050. The forecast of gross installed capacity of NPP power units all over the world until 2050 is developed as follows: up to 456 GW under the base-case scenario, and up to 600 GW under the best-case scenario. It is shown that under the best-case scenario of global electricity production at NPPs (existing as of 01.01.2015), recoverable natural uranium resources (with a production cost of USD 260 per kg) will be sufficient until 2100.

Key words: global electricity production, electricity production at NPPs, electricity consumption rate, population change, elasticity coefficient.

² Bulat I. Nigmatulin – General Director of the Energy Research Institute, adviser to Vice President for Marketing and Business Development at Rusatom Overseas, Doctor of Engineering, Full Professor, e-mail: nb@geotar.ru

УДК 621.039.5

С.З. Жизнин, В.М. Тимохов¹

ДИПЛОМАТИЯ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Дипломатия в ядерной энергетике имеет некоторые отличия от традиционной энергетической дипломатии. Это связано, прежде всего, с проблемами обеспечения радиационной безопасности, опасности распространения ядерных материалов, которые могут быть использованы в военных целях группами международных террористов и другими рисками. Кроме этого, в ядерной энергетике сосредоточен мощнейший технологический и интеллектуальный потенциал, который в процессе ее развития может принести человечеству много неожиданных полезных открытий и находок для использования в других отраслях.

Ключевые слова: энергетическая дипломатия, энергетическая безопасность, ядерная геополитика, командные центры ядерной энергетики.

После энергетического кризиса середины 70-х гг. прошлого столетия во многих государствах были разработаны комплексы особых внешнеполитических и внешнеэкономических мер, в реализации которых участвовала также официальная дипломатия, в ряде стран сформировались функциональные направления во внешней энергетической политике и дипломатии – *внешняя энергетическая политика и энергетическая дипломатия* [1-3].

Понятие «энергетическая дипломатия» в первую очередь подразумевает практическую деятельность внешнеполитических, внешнеэкономических и энергетических ведомств, в ряде случаев – совместно с компаниями, по осуществлению целей и задач «внешней энергетической политики».

В ядерной энергетике, также как и нефтегазовой отрасли, существуют страны-экспортеры и импортеры ядерного сырья, топлива и технологий, компании, вовлеченные в ядерный бизнес, но их количество значительно меньше. На рынках ядерной энергетики небольшая группа компаний фактически являются монополистами, но, тем не менее, между ними идет жесткая конкуренция за потребителей. Наконец, ядерная энергетика имеет очевидное геополитическое измерение. Все это в значительной мере определяет необходимость усиления ядерных акцентов в мировой дипломатии, что позволит избежать конфликтов экономических и геополитических,

а также риска попадания ядерных материалов в руки террористов.

В настоящее время в ядерной энергетике сложилась система «командных центров» мировой политики и дипломатии на глобальном, региональном, страновом и корпоративном уровнях. Формируются организационно-правовые основы двусторонней и многосторонней дипломатии в ядерной сфере. Эти факторы определяют новое направление энергетической дипломатии – «дипломатия в ядерной энергетике», которая подразумевает внешнеполитическую и внешнеэкономическую деятельность государств по обеспечению своих экономических и геополитических интересов в международном сотрудничестве в области мирного использования атомной энергии.

В ряде ведущих стран мира ядерное направление энергетической дипломатии занимает приоритетное место в дипломатической деятельности, в которую вовлечены не только внешнеполитические и энергетические ведомства, но также и руководители государств. Среди зарубежных стран следует отметить США, где дипломатией в ядерной сфере занимается Госдепартамент и Министерство энергетики. Эти ведомства совместно с американскими компаниями активно занимаются продвижением американских ядерных технологий и материалов на экспорт, обеспечивая не только внешнеэкономические, но и геополитические интересы

¹ Станислав Захарович Жизнин – профессор Международного института энергетической политики и дипломатии МГИМО МИД РФ, президент Центра энергетической дипломатии и геополитики, д.э.н., e-mail: s.zhiznin@rambler.ru;
Владимир Михайлович Тимохов – генеральный директор Центра энергетической дипломатии и геополитики, к.ф.м.н., e-mail: vl.timokhov@gmail.com

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

США. В России ядерными аспектами энергетической дипломатии занимается ГК «Росатом» в тесном взаимодействии с МИДом и другими ведомствами при координации со стороны руководства страны.

Геополитические и экономические аспекты ядерной энергетики

Геополитика – одно из фундаментальных понятий теории международных отношений, характеризующее место и конкретно-исторические формы воздействия территориально-пространственных особенностей положения государств или их блоков на региональные, континентальные и глобальные международные процессы.

Исторически становление геополитики, как политической науки, связано с исследованием роли географических факторов, в том числе конфигурации территории и положения конкретной страны в географическом регионе. Эти факторы используются для обоснования внешней политики конкретной страны в отношении других стран, чаще всего расположенных в том же или прилегающих регионах. Это может быть связано с выходом к морю, доступом к судоходным рекам, морским проливам, месторождениям полезных ископаемых или территориям, пригодным для различных видов хозяйственной деятельности и т.д. Если говорить об энергетической геополитике, то нужно еще рассматривать такие факторы, как геополитическое значение технологических программ, использование энергетики в качестве инструмента в международных отношениях с целью обеспечения не только национальных экономических, но и геополитических интересов отдельных стран.

Геополитические интересы государства в международных отношениях вытекают из общих национальных интересов и предполагают специфический анализ и оценку внешнеполитических и внешнеэкономических проблем. При этом применяется пространственная логика, основанная в первую очередь на географических реалиях, которая может не принимать во внимание некоторые категории, например, в области экономики, морали, религии и т.д.

Динамичное развитие мировой ядерной энергетики в начале XXI в., сопровождающееся

значительным расширением потоков международной торговли ресурсами, оборудованием и услугами, сделало актуальным понятие «геополитические аспекты ядерной энергетики». Среди них нужно выделить географическое положение крупнейших месторождений урана с точки зрения их удаленности от основных рынков сбыта, возможности транспортировки и переработки этих ресурсов, а также проблемы транспортировки и захоронения отработанного ядерного топлива АЭС.

В работе [4, с. 11] введен термин «ядерная геополитика», с которым можно согласиться. Под ядерной геополитикой авторы понимают деятельность государств, международных организаций и неправительственных институтов в международных отношениях в глобальном и региональных ядерных пространствах с целью достижения своих интересов с учетом системного влияния внешних и внутренних факторов. В своей работе авторы акцентируют внимание главным образом на военное направление использования ядерной энергии.

В настоящей работе мы рассматриваем ее мирное применение, которое, в свою очередь, имеет свои геополитические измерения. В этой связи можно отметить большую геополитическую значимость стран и компаний, обладающих значительными запасами урана, технологиями его обогащения, производства ядерного топлива, оборудования, проектирования, строительства и обслуживания АЭС.

Приведем также два примера конфликтов, имеющих геополитическую подоплеку в ядерной энергетике. Первый, это отказ Литвы от Ингалинской АЭС под давлением США и ЕС, несмотря на явные экономические преимущества для этой страны. Второй пример – отказ Болгарии от проекта строительства АЭС в Белеене с участием России, который был принят также под давлением страна Запада, несмотря на существенные экономические потери Софии в результате такого решения.

Изменение геополитической расстановки сил в мире после распада СССР, СЭВ и Варшавского договора существенно ослабило определенную стабильность, существовавшую на основе паритета Советского Союза и США в области стратегических ядерных вооружений. Несмотря

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

на надежды мирового сообщества, связанные с окончанием «холодной войны» и возможностях сосредоточиться на поиске рациональных путей решения глобальных проблем, включая ядерную энергетику и экологию, этого не случилось. В условиях однополярного мира появились новые угрозы и вызовы политической и экономической стабильности в глобальном и региональном планах. Заметно усилилось влияние политических факторов в целом, и геополитических – в частности, на мировую ядерную энергетику и мировые рынки в этой сфере.

Поскольку использование атомной энергии в мирных целях иногда переплетается с военными программами, то наблюдается сильное международное воздействие, прежде всего по линии ООН и МАГАТЭ, на страны, которые под предлогом развития ядерной энергетики предпринимали попытки создания ядерного оружия в нарушение принципа нераспространения. Наиболее известными примерами является ситуация вокруг Северной Кореи и ядерной программы Ирана [5, с. 67].

Северная Корея, получив от СССР в 80-е годы прошлого столетия технологии и оборудование для строительства АЭС в соответствии с межправительственным соглашением, заключенном в 1985 г., так и не завершила этот проект. Вместо этого руководство страны в условиях сильного внешнего давления со стороны США, Японии и Южной Кореи, которое северокорейские лидеры воспринимали в качестве угрозы своего свержения, приступили к созданию собственного ядерного оружия. В 1993 г. страна официально вышла из Договора по нераспространению атомного оружия, а в 1994 г. запретила инспекции МАГАТЭ на своей территории. К настоящему времени в стране проведено несколько подземных испытаний ядерных боезарядов, а также осуществлены пуски баллистических ракет, тем самым создается угроза международной безопасности. Хотя страна находится в полной изоляции, ее руководство продолжает создавать ракетно-ядерный арсенал, что увеличивает ее геополитическое значение в мире, несмотря на низкий экономический потенциал.

Программа развития ядерной энергетики Ирана началась в 1967 г. при поддержке США. В 1960-е гг. были подписаны соглашения между

Ираном и Францией о сотрудничестве по очистке и обогащению урановых руд. В начале 70-х гг. прошлого века появилась программа создания в стране сети АЭС из 23-х энергоблоков. Эту программу поддерживали США и европейские страны. В те времена Иран заявлял о намерении развивать ядерную энергетику без целей создания ядерного оружия. Страна является членом МАГАТЭ, участником Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой, а также Договора о нераспространении ядерного оружия. После свержения проамериканского режима в 1979 г. новое руководство страны замыслило создать ядерное оружие с целью защитить страну после установления в ней исламского порядка, а также усилить свои геополитические позиции в регионе. В этой связи со стороны США, России, других стран, ООН и МАГАТЭ были предприняты меры с целью заставить Тегеран отказаться от своей ядерной программы. Против страны было введено эмбарго, что существенно ухудшило ее экономическое положение. Санкции сказались и на реализации проекта строительства АЭС «Бушер», от которого отказалась компания «Сименс», а в 1990-е гг. в этом проекте стала участвовать Россия. В 2015 г. под сильным влиянием России и отказа Ирана от программы создания ядерного оружия эмбарго было снято. Это позволило продолжить реализацию проекта АЭС «Бушер». При содействии «Росатома» наработанное Ираном высокообогащенное ядерное топливо, которое могло быть использовано для изготовления боезарядов, было вывезено в Россию в обмен на российский природный уран, что было предусмотрено соглашением между Тегераном и международной «шестеркой».

Геополитику нередко связывают с геоэкономикой, под которой чаще всего понимается внешнеполитическая деятельность государства, исходящая из установки на достижение преимуществ над другими странами с помощью экономических рычагов. Рассматривая эту концепцию в отношении энергетической сферы, следует обратить внимание на то, что энергетический фактор неоднократно использовался для достижения внешнеполитических целей. В качестве примера можно напомнить навязывание США

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

своих ядерных технологий и ядерного топлива для украинских АЭС в целях разорвать давно сложившееся тесное и взаимовыгодное сотрудничество между Украиной и Россией в ядерной энергетике.

Состояние ядерной энергетики оказывает большое влияние на могущество ряда стран мира. *Могущество государства* – понятие из политологической науки, означающее совокупность политических, финансово-экономических, военных, социальных, технологических, гуманитарных, геополитических и других факторов, определяющих роль и степень влияния государства в международных отношениях. Говоря о роли ядерного энергетического фактора в структуре могущества государства, можно отметить, что это касается ресурсно-сырьевой базы, промышленной инфраструктуры, а также наличия современных корпораций в сфере ядерной энергетики.

Необходимость решения проблем устойчивого энергообеспечения в условиях глобализации энергетики и усиления энергетической взаимозависимости привела к возрастанию активности внешнеполитических и внешнеэкономических ведомств многих государств на ядерном направлении энергетической дипломатии.

Предметом дипломатической деятельности часто становятся крупные энергетические проекты с привлечением зарубежных инвестиций для их реализации, вопросы обеспечения поставок топлива для АЭС, решения проблем захоронения отработанного топлива, стабильности и предсказуемости рынков ядерной энергетики. В целях совершенствования систем ядерной и энергетической безопасности, а также развития мировых рынков ядерного сырья и технологий, необходимо усиление межгосударственного регулирования и технологического совершенствования с учетом современных экологических стандартов для развития ядерной энергетики. В первую очередь это относится к странам-членам МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР, а также другим глобальным и региональным организациям международного сотрудничества в мирном использовании атомной энергии.

Ядерная энергия играет свою самостоятельную роль в геополитических интересах России. Эта концепция определяется целым рядом факторов, среди которых можно выделить:

а) сохранение ключевых позиций России на рынке тех стран СНГ, Восточной и Северной Европы, где были установлены и успешно функционируют АЭС российского производства;

б) тенденции к расширению экспорта российского ядерного энергетического оборудования в развивающиеся страны (Иран, Индия, Китай и др.), которые будут способствовать усилению российского присутствия в них;

в) статус великой ядерной державы, являющийся важнейшим показателем особого геополитического положения России в мире.

Экономика ядерной энергетики имеет свои особенности, которые выделяют ее из большинства конкурирующих технологий. К ним относятся: высокая наукоемкость, требующая большого объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ для обеспечения и обоснования ядерной радиационной безопасности; чрезвычайно большой объем и более длительный период проектирования и сооружения; низкие эксплуатационные затраты и затраты на топливо и т.д., но в целом она конкурентоспособна с энергетикой на органическом топливе. Бизнес во всех сегментах ядерной энергетики является выгодным, но, в отличие от нефтегазовой отрасли, количество стран-экспортеров и импортеров ядерного сырья, топлива и технологий значительно меньше. Однако наблюдается рост торгового оборота на всех рынках, имеющих отношение к отрасли. Так, в 2015 г. он составил, согласно нашим оценкам по материалам годового отчета ГК «Росатом» за 2015 год [6], порядка 300 млрд долларов. Более подробно экономические аспекты ядерной энергетики мы рассматривали в работах [5, 7, 8].

Командные центры развития мировой ядерной энергетики

Международное взаимодействие в ядерной энергетике в основном обусловлено необходимостью обеспечения внешнеэкономических и внешнеполитических национальных интересов различных государств и нахождения их баланса. Можно выделить интересы трех групп государств: 1) стран – пользователей АЭС, 2) стран – обладателей ядерными технологиями, 3) ресурсных стран. Кроме того, следует обратить

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

внимание на то, что после распада СССР, приведшего к возникновению однополярного мира, у ряда государств появились свои геополитические интересы в энергетической области. Различные сочетания и комбинации интересов указанных групп стран в отношениях между ними, а также внутри этих групп в немалой степени будут определять степень воздействия политических и экономических факторов на ядерную энергетику в нынешнем столетии.

Кроме того, основную практическую роль в мировой ядерной энергетике играют несколько десятков крупных компаний, а также ряд сравнительно небольших фирм. Эти компании можно разделить на четыре группы:

- 1) компании по добыче и обогащению урана, производству ядерного топлива;
- 2) компании по проектированию, строительству и обслуживанию АЭС;
- 3) компании, производящие оборудование для АЭС;
- 4) компании в сфере ядерной медицины, утилизации РАО и ОЯТ и пр.

Отметим также, что в зависимости от характера бизнеса количество групп может быть и больше.

Важно отметить, что к настоящему времени в мире сформировалась и продолжает развиваться система *командных центров развития мировой ядерной энергетике*.

Под командными центрами авторы подразумевают организации, институты, страны, а также компании, в которых разрабатываются и принимаются все важные стратегические решения, связанные с развитием ядерной энергетике и обеспечением радиационной безопасности. Термин «командные центры» в развитии мировой ядерной энергетике используется нами, исходя из распространенной в международной практике и науке концепции «мирового управления» в разных сферах экономики (world governance).

Для оценки роли и степени влияния основных центров развития мировой ядерной энергетике были рассмотрены их структурные связи в системе международных отношений. Для этого использовался метод системного анализа, который является одним из наиболее распространенных приемов исследований международных отношений и организаций. Имеется много

определений понятий «система». Большинство из них, согласно теории систем, сводится к существованию основных соотношений и связей между всеми отраслями знаний, экономики и политики. Чаще всего «система» понимается как нечто целое, состоящее из сложенных вместе или собранных по соответствующим общим критериям и признакам элементов. В системном анализе в качестве системы могут рассматриваться некоторые ее элементы, которые иногда называют подсистемами [9].

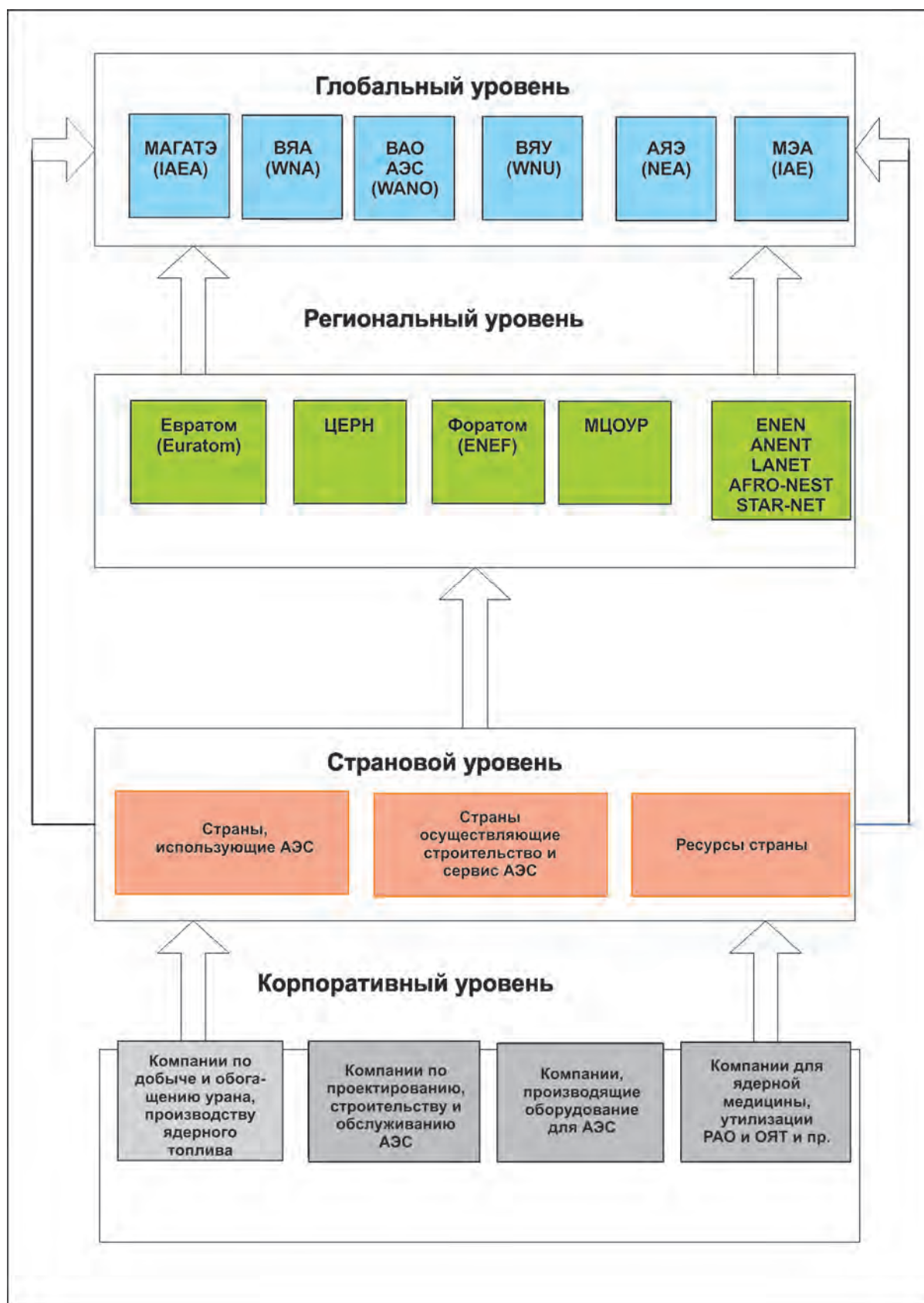
Применяя этот метод для исследования процессов в центрах развития мировой ядерной энергетике в международных отношениях, можно говорить о формировании соответствующей системы на глобальном уровне, а также подсистем на региональных уровнях, страновом и корпоративном уровнях. Пока еще нельзя утверждать, что эта система и ее подсистемы полностью сформированы. В то же время создание и развитие ряда международных организаций и институтов ядерно-энергетического профиля, имеющих общие признаки, позволяют утверждать о наличии элементов формирующейся глобальной системы развития мировой ядерной энергетике. В первую очередь это относится к специализированным международным организациям: МАГАТЭ [10] и АЯЭ ОЭСР [11].

На региональном уровне развиваются различные организации и институты многостороннего сотрудничества в ядерной энергетике, которые в определенной степени можно назвать элементами региональных подсистем. Кроме того, формируются международные управленческие структуры в рамках реализации ряда многосторонних международных проектов в области ядерно-энергетических инноваций.

Базовыми элементами системы мировой энергетической политики являются страны, входящие в определенные выше три группы, а также ведущие частные и государственные компании, вовлеченные в международный бизнес в сфере ядерной энергетике. Элементы и структурные связи системы «командных центров в мировой ядерной энергетике» (международных организаций и институтов, стран и корпораций) приведены на рисунке.

Система командных центров состоит из четырех уровней:

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ



Источник: подготовлено авторами по материалам [10-12, 20].

Командные центры развития мировой ядерной энергетики

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

1. Глобальный уровень, куда входят международные организации и институты: МАГАТЭ [10], ВЯА [12], ВАО АЭС [13], ВЯУ [14], АЯЭ [11], МЭА [15].

2. Региональный уровень (международные организации и институты): Евратом [16], ЦЕРН [17], Форатом [18], МЦОУР [19], сети ядерного образования при ООН (ENEN, ANENT, LANET, AFRO-NEST, SNAR-NET).

3. Страновой уровень (3 группы стран определены выше).

4. Корпоративный уровень (4 группы компаний).

От взаимодействия между всеми участниками мировой ядерной отрасли в рамках этой системы во многом зависит будущее этой отрасли. По сути, можно утверждать, что речь идет о формировании системы «командных» центров ядерного направления энергетической дипломатии, поскольку деятельность этих центров нередко помогает избегать конфликта геополитических и экономических интересов, чтобы находить взаимовыгодные решения на основе баланса этих интересов. Как отмечал один из классиков дипломатической теории Г. Никольсон, важным предназначением дипломатии является установление и поддержание отношений между различными субъектами, имеющими противоположные или подчас разные интересы [9]. Подразумевается, прежде всего, определение самих интересов с целью нахождения их баланса. Это справедливо и по отношению к дипломатии в ядерной энергетике, где субъектами выступают государства, их ассоциации и компании. Россия активно участвует в развитии многостороннего и двустороннего сотрудничества в ядерной энергетике, а также усиливает свои позиции в международном бизнесе этой сферы. Это подразумевает, что Россия и ее представитель – ГК «Росатом» вовлечены в дипломатическую деятельность в сфере ядерной энергетики.

Формирование и развитие дипломатии ГК «Росатом»

Госкорпорация «Росатом» (далее «Росатом») является проводником политики Российской Федерации в области использования атомной энергии. Она обеспечивает выполнение россий-

ских международных обязательств в ядерной сфере. «Росатом» является исполнительным органом РФ по вопросам сотрудничества в области мирного использования атомной энергии при реализации межгосударственных и межправительственных соглашений. Особое внимание уделяется сотрудничеству по обеспечению и укреплению международного режима нераспространения ядерного оружия [6].

Важно отметить, что внешнеэкономическая деятельность «Ростама» опирается на солидную базу участия советских, а затем и российских специалистов по строительству и эксплуатации АЭС во многих зарубежных странах. «Росатом» был образован в 2007 г. на базе упраздненного Федерального агентства по атомной энергии РФ, которое являлось правопреемником Министерства атомной энергетики (Минатом) РФ. В свою очередь Минатом РФ был образован на базе Министерства атомной энергетики и промышленности СССР, которое было сформировано в 1989 г. после объединения Министерства среднего машиностроения СССР и Министерства атомной энергетики СССР.

Внешнеэкономическая деятельность советской ядерной энергетики началась в 1965 г., когда было подписано межправительственное соглашение между СССР и ГДР по строительству первого блока АЭС в ГДР. Всего за период с 1965 по 1986 гг. было заключено свыше 20-ти межправительственных соглашений по строительству 61-го энергоблока АЭС в следующих странах: ГДР, Болгария, Венгрия, Чехословакия, Финляндия, Румыния, Польша, Ливия, Куба и КНДР [21]. Хотя не все эти проекты были завершены, тем не менее в целом ряде стран АЭС были построены, что имело не только внешнеэкономический, но и геополитический эффект для СССР и в последствии для России.

Среди основных целей международной деятельности «Росатома», в которой он действует в тесном сотрудничестве с МИД РФ, является создание благоприятных международно-правовых и политических условий для продвижения российских ядерных технологий на мировые рынки, укрепление режимов ядерной безопасности и ядерного нераспространения, а также активное участие в работе международных организаций и форумов.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

«Росатом» принимает активное участие в подготовке межправительственных соглашений Российской Федерации по сотрудничеству с зарубежными странами и межведомственных документов, обеспечивающих реализацию этих соглашений. По состоянию на 31 декабря 2014 г., при участии «Ростатома» было подписано около 80-ти соглашений и межведомственных договоренностей. Немаловажную роль в его деятельности занимают вопросы импортозамещения и системной модернизации отрасли энергомашиностроения, включая производство оборудования для атомной энергетики. Необходимость такой модернизации была обоснована нами еще в работе [22].

Важно отметить, что в своей внешнеэкономической деятельности «Росатом» совместно с МИД, другими министерствами, посольствами и торгпредствами России осуществляет дипломатическое сопровождение реализации наиболее крупных проектов, прежде всего по строительству АЭС в зарубежных странах. В этих целях «Ростатом» успешно практикует создание своих представительств при посольствах и торгпредствах в ряде стран. На конец 2014 г. функционировали представительства «Росатома» в 14-ти государствах, сотрудники которых принимают активное участие в работе с зарубежными партнерами в странах пребывания.

Одним из приоритетов дипломатии «Росатома» является развитие сотрудничества с рядом международных организаций, направленного на обеспечение ядерной безопасности и доступа всех заинтересованных стран к ядерной энергии. В первую очередь это касается взаимодействия с Международным агентством по ядерной энергии (МАГАТЭ), Агентством по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР), Комиссией государств-участников СНГ по использованию атомной энергии в мирных целях. Проводится работа по подготовке и повышению квалификации кадров в области использования атомной энергии в мирных целях, по изучению и внедрению лучших практик в области эксплуатации АЭС, обеспечению ядерной и радиационной безопасности, выводу из эксплуатации ядерных и радиационно-опасных объектов, реабилитации территорий, подвергшихся воздействию

ядерных предприятий. На этих площадках действуют форумы заинтересованных сторон [6].

Отдельно следует отметить, что с 1 января 2013 г. Россия стала полноправным членом АЯЭ ОЭСР [11]. «Росатом» и другие российские организации принимают активное участие в исследовательских, расчетных и экспериментальных проектах и программах Агентства, что будет способствовать развитию российских инновационных ядерно-энергетических технологий, повышению ядерной и радиационной безопасности. Большая работа также проводится в рамках Многонациональной программы оценки новых проектов АЭС (МДЕП) совместно с другими странами-участницами (Великобритания, Индия, Канада, Китай, Россия, США, Финляндия, Франция, Швеция, ЮАР, Южная Корея и Япония) по согласованию национальных подходов к лицензированию и определению подходов к взаимопризнанию результатов экспертизы новых проектов АЭС. Налажено сотрудничество с АЯЭ ОЭСР и по другим направлениям, в частности ядерной медицины.

Госкорпорация «Росатом» от имени Российской Федерации участвует в ряде международных инновационных исследовательских проектах, в частности «Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам» (ИНПРО) [23], «Международный форум «Поколение IV» (GIF) [24] и «Устойчивая технологическая платформа атомной энергетики» (SNETP) [25].

Отдельно целесообразно отметить, что в рамках реализации инициативы Президента РФ В.В. Путина 2006 г. о формировании глобальной инфраструктуры атомной энергетики создан Международный центр по обогащению урана (МЦОУР) [19], в работе которого принимают участие ряд зарубежных партнеров. В развитие инициативы подписано Соглашение между Правительством РФ и МАГАТЭ о создании на территории России гарантийного запаса низкообогащенного урана в объеме 120 тонн. «Запас НОУ является своего рода «страховкой», позволяющей стране, по каким-либо причинам лишенной возможности купить уран на свободном рынке, в любой момент обеспечить себя необходимым количеством этого материала» [6].

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

Международная деятельность «Росатома» призвана обеспечить не только внешнеэкономические, но и геополитические интересы России. «Росатом» обязан обеспечить интересы страны, касающиеся ее безопасности в военном отношении, способствовать достижению лидирующих позиций российских компаний корпорации на мировом рынке ядерных услуг и технологий. Каждая АЭС, построенная «Росатомом» за рубежом, очень важна как для этой страны, так и для России. Она создает такой позитивный эффект, который способствует развитию дружеских отношений между государствами, что, в свою очередь, также активно формирует и поддерживает геополитические интересы России.

Россия на международных рынках ядерной энергетики

В настоящее время в России и мире существуют различные рынки, связанные с развитием ядерной энергетики. К ним относятся: рынок природного урана; рынок услуг по конверсии и обогащению урана; рынок ядерного топлива; рынок энергомашиностроения; рынок сооружения и сервиса АЭС; рынок электроэнергии и мощности; рынок обращения с радиоактивными отходами (РАО) и отработанного ядерного топлива (ОЯТ), вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии; рынок радиационных технологий и некоторые другие. Основные емкости этих рынков, доля присутствия на них «Росатома» показаны в работе [6]. Из этих данных следует, что Госкорпорация «Росатом» присутствует во всех представленных рынках.

В 2015 г. госкорпорация занимала: 13% мировой добычи урана; более 1/3 мирового рынка обогащения урана; 17% рынка ядерного топлива; первое место в мире по количеству энерго-

блоков АЭС в зарубежных проектах. Она является одним из основных участников мирового рынка обращения с радиоактивными отходами (РАО), отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и вывода из эксплуатации ядерных и радиационно-опасных объектов. На рынке радиационных технологий вклад «Росатома» пока невысок, но корпорация активно увеличивает свою долю присутствия и в этом сегменте, диверсифицирует свой бизнес, выходит на новые рынки, продвигает на международный рынок новые, конкурентоспособные продукты.

Важно также отметить, что «Росатом» является единственной в мире атомной корпорацией, которая работает во всех сегментах производства – от добычи природного урана до проектирования и строительства АЭС, ее эксплуатации и обслуживании, вывода АЭС из эксплуатации, утилизации радиоактивных отходов или переработки отработанного ядерного топлива. При этом она сочетает функции как оператора, так и поставщика технологий, что дает возможность предлагать решения «под ключ». В значительной степени это связано с тем, что в России не было так называемой «атомной паузы» после постчернобыльского атомного затишья, а также распада СССР. Даже в эти тяжелые годы велись научные разработки, продолжали строиться новые АЭС, отрабатывались различные ядерные технологии. Согласно среднесрочным прогнозам, «Росатом» планирует нарастить долю новых бизнесов в структуре выручки с 15% в 2015 г. до 30% в 2030 году.

Таким образом, активная деятельность госкорпорации и сформированный портфель заказов в 2016 г. позволяют утверждать, что ядерная энергетика продолжает развиваться в мире, и, как указывалось выше, эта деятельность способствует укреплению геополитических интересов России в этих регионах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жизнин С.З. Основы энергетической дипломатии, учебник в 2 т. МГИМО (университет) МИД России, МИТЭК, М., 2003, т. 1, 320 с.
2. Жизнин С.З., Тимохов В.М. Технологические аспекты энергетической дипломатии России // Вестник МГИМО, № 3 (48), 2016, с. 43-53.
3. Жизнин С.З. Энергетическая дипломатия и модернизация ТЭК России // Международная жизнь. 2012, с. 15-32.
4. Анненков В.И., Кононов Л.А, Моисеев А.В. Ядерный мир: геополитические и военно-политические аспекты современности. М.: Русайнс, 2016, 282 с.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НОВЫЕ ВЫЗОВЫ И СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ПРИОРИТЕТЫ

5. Жизнин С.З., Тимохов В.М. Геополитические и экономические аспекты развития ядерной энергетики. Вестник МГИМО, № 4 (43), 2016, с. 64-73.
6. Годовой публичный отчет Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» за 2015 год. URL: <http://www.rosatom.ru/about/publicnaya-otchetnost/>.
7. Жизнин С.З., Тимохов В.М. Экономические аспекты некоторых перспективных ядерных технологий за рубежом и в России // Вестник МГИМО, № 6 (45), 2016, с. 284-297.
8. Жизнин С.З., Тимохов В.М. Перспективы международного сотрудничества в развитии термоядерной энергетики. Экономические и экологические аспекты // Энергетическая политика, 2016, № 3, с. 98-108.
9. Nicolson H. *Diplomasy*. New York: Oxford Univ. Press. 1964, p. 26-27.
10. International Atomic Energy Agency. URL: <https://www.iaea.org/>.
11. Nuclear Energy Agency. URL: <http://www.oecd-nea.org>.
12. World Nuclear Association. URL: <http://www.world-nuclear.org/>.
13. World Association of Nuclear Operators. URL: <http://www.wano.info>.
14. World Nuclear University. URL: <http://www.world-nuclear-university.org/imis20/wnu/>.
15. International Energy Agency. URL: <http://www.iea.org>.
16. Euratom. URL: <http://www.euratom.org/>.
17. Европейский центр ядерных исследований. URL: <http://home.cern/>.
18. European Nuclear Energy Forum (ENEF). URL: <https://ec.europa.eu/>.
19. Международный центр по обогащению урана. URL: <http://www.iuec.ru/>.
20. Доклад ген. директора МАГАТЭ. Обзор ядерных технологий – 2015. URL: https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC59/.../gc59inf-2_rus.pdf.
21. Козлов В.В. Атомная энергетика России за рубежом. М.: Энергоатомиздат, 2001, с. 40.
22. Жизнин С.З., Тимохов В.М. Международная энергетическая безопасность и модернизация ТЭК России // Энергетическая политика, 2011, № 6, с. 21-29.
23. INPRO. URL: <http://www.iaea.org/INPRO>.
24. Generation IV International Forum. URL: <http://www.gen-4.org/index.html>.
25. Sustainable Nuclear Energy Technology Platform. URL: <http://www.snetp.eu/>.

Поступила в редакцию
26.05.2017 г.

S.Z. Zhiznin, V.M. Timokhov²

DIPLOMACY IN NUCLEAR ENERGY

Diplomacy in nuclear energy has some differences from traditional energy diplomacy. This is primarily due to the problems of ensuring radiation safety, the danger of the proliferation of nuclear materials, which can be used for military purposes by groups of international terrorists and other risks. In addition, the nuclear power industry has a powerful technological and intellectual potential that, in the process of its development, can bring to mankind many unexpected useful discoveries and finds for use in other industries.

Key words: energy diplomacy, energy security, nuclear geopolitics, command centers of nuclear energy.

² Stanislaw Z. Zhiznin – Professor MIEP MGIMO (University) of the MFA of the Russian Federation, professor, Doctor of Economics, e-mail: s.zhiznin@rambler.ru;

Vladimir M. Timokhov – General Director of the Center of Energy Diplomacy and Geopolitics, Ph.D, e-mail: vl.timokhov@gmail.com.

ПОЗДРАВЛЯЕМ А.М. МАСТЕПАНОВА!



Редакция журнала «Энергетическая политика» и коллектив Института энергетической стратегии от всей души поздравляют с юбилеем известного и авторитетного специалиста топливно-энергетического комплекса, заместителя директора – руководителя направления глобальной энергетики Института энергетической стратегии, заместителя главного редактора и постоянного автора журнала «Энергетическая политика», а также многочисленных статей, брошюр, докладов и книг, опубликованных как у нас в стране, так и за рубежом, профессора, академика РАЕН, доктора экономических наук, дважды лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники, заслуженного работника топливно-энергетического комплекса – **АЛЕКСЕЯ МИХАЙЛОВИЧА МАСТЕПАНОВА!**

Желаем ему крепкого здоровья, неиссякаемой жизненной энергии, активного творческого долголетия, новых научных свершений, больше радости и позитива в жизни и всего самого наилучшего!

ПОЗДРАВЛЯЕМ А.Н. ДМИТРИЕВСКОГО!



Редакция журнала «Энергетическая политика» и коллектив Института энергетической стратегии от всей души поздравляют с юбилеем видного российского ученого, организатора и многолетнего руководителя Института проблем нефти и газа РАН, признанного научного лидера ученых, работающих в нефтегазовой отрасли, академика РАН, доктора геолого-минералогических наук, автора многочисленных научных работ, открытий и изобретений, позволивших разработать эффективную стратегию поисково-разведочных работ, что обеспечило существенное расширение сырьевой базы нефтяной и газовой промышленности России, лауреата государственных и профессиональных премий, обладателя государственных наград и почетных званий, члена редакционной коллегии журнала «Энергетическая политика» – АНАТОЛИЯ НИКОЛАЕВИЧА ДМИТРИЕВСКОГО!

Желаем ему крепкого здоровья, неиссякаемой жизненной энергии, активного творческого долголетия, новых научных свершений, больше радости и позитива в жизни и всего самого наилучшего!

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. На первой странице статьи необходимо указать: индекс УДК (над заголовком статьи слева), имя, отчество, фамилию автора, название статьи. В статье должна быть аннотация — не более 400–600 печатных знаков с пробелами и перечень ключевых слов (5-6).

2. Статьи должны быть структурированы. Рекомендуется стандартная рубрикация разделов: введение, постановка проблемы (задачи исследования); основная часть — обсуждение проблемы; заключение (выводы).

Текст предоставляется в распечатанном виде и на электронном носителе. Текст должен быть распечатан шрифтом Times New Roman, 12 кегля, через 1,5 интервала, с полями по 2 см сверху, снизу, слева и справа. Страницы должны быть пронумерованы снизу справа. Объем статьи — 10–15 стандартных страниц (не более 30 тыс. знаков с пробелами) и 2–3 рисунка (сюда же входят таблицы и список литературы).

3. Таблицы предоставляются в тексте статьи, через 1,5 интервала, кегль 11.

4. Нумерация формул (сплошная по всей статье) указывается в скобках (в порядке возрастания) цифрами (1, 2 и т.д.) с правой стороны (в правый край набора).

5. Иллюстрации предоставляются в тексте статьи в электронном виде. На рисунках нужно избегать лишних деталей и надписей (надписи необходимо заменять цифрами или буквами, разъяснение которых дается в подрисуночных подписях или в тексте). Линии на рисунках должны быть четкими (5–6 pñ), ширина рисунков не должна превышать 140 мм, высота — 200 мм. Шрифт буквенных и цифровых обозначений на рисунке — Times New Roman (9–10 кегль). Рисунки должны быть черно-белыми, с разными типами штриховки (с размером шага, позволяющим дальнейшее уменьшение).

6. Подрисуночные подписи предоставляются в тексте статьи, через 1,5 интервала, кегль 12.

7. Список литературы приводится в конце статьи, имеет сплошную нумерацию арабскими цифрами. По тексту статьи даются ссылки на номер в квадратных скобках: [1]. Библиографическое описание дается в следующем порядке: фамилия, инициалы автора (авторов), полное название монографии, место издания, издательство, год издания; для периодических изданий — фамилии, инициалы авторов, название статьи, название журнала, год выпуска, том, номер, страницы.

8. После списка литературы необходимо указать сведения об авторе (авторах): должность, ученую степень, звание, e-mail (если нет — контактный телефон).

9. Рукописи авторам не возвращаются.

10. Плата за публикации не взимается.

Благодарим за соблюдение наших правил и рекомендаций

