

СОДЕРЖАНИЕ

Том 91, номер 5, 2021

Научная сессия Общего собрания членов РАН “75 лет атомной отрасли. Вклад Академии наук”

Синтез науки и технологий завтрашнего дня	403
Приветствие Президента Российской Федерации <i>В.В. Путина</i> участникам Общего собрания Российской академии наук	405
Приветственный адрес заместителя председателя Правительства Российской Федерации <i>Д.Н. Чернышенко</i>	406
Вступительное слово Президента РАН академика РАН <i>А.М. Сергеева</i>	407
Выступление министра науки и высшего образования РФ <i>В.Н. Фалькова</i>	409
Выступление министра здравоохранения РФ <i>М.А. Мурашко</i>	411
Выступление генерального директора Госкорпорации “Росатом” <i>А.Е. Лихачёва</i>	412
<i>Р. И. Илькаев, Л. Д. Рябев</i> Академия наук и Атомный проект в СССР	414
<i>В. Е. Фортон, Р. И. Илькаев, Г. Н. Рыкованов, В. Д. Селемир, Б. Ю. Шарков</i> Взрывы, мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества	422
<i>С. Г. Гаранин, С. В. Гарнов, А. М. Сергеев, Е. А. Хазанов</i> Мощные лазеры для физики высоких плотностей энергии	435
<i>С. Н. Лебедев, Б. Н. Четверушкин, Р. М. Шагалиев</i> Вычислительные и информационные технологии в атомной отрасли	446
<i>Е. О. Адамов, В. Г. Асмолов, Л. А. Большов, В. К. Иванов</i> Двухкомпонентная ядерная энергетика	450
<i>Б. Ф. Мясоедов, С. Н. Калмыков, А. Ю. Шадрин</i> Химические технологии замыкания ядерного топливного цикла	459
<i>Е. П. Велихов, В. И. Ильгисонис</i> Перспективы термоядерных исследований	470
<i>А. В. Дуб, А. И. Рудской</i> Новые материалы для ядерной энергетика	479
<i>Н. Н. Пономарёв-Степной</i> Атомно-водородная энергетика	484

Официальный отдел

Награды и премии	499
------------------	-----

CONTENTS

Vol. 91, No. 5, 2021

Scientific Session of the General Meeting of RAS Members “75 years of the nuclear industry. Contribution of the Academy of Sciences”

Synthesis of science and technology of tomorrow	403
Greeting of the President of the Russian Federation <i>Vladimir Putin</i> to the participants of the General Meeting of the Russian Academy of Sciences	405
Welcome address of the Russian Federation Government Vice-Chairman <i>D.N. Chernyshenko</i>	406
Opening speech of the President of the Russian Academy of Sciences Academician <i>A.M. Sergeev</i>	407
Speech by the Minister of Science and Higher Education of the Russian Federation <i>V.N. Falkov</i>	409
Speech by the Minister of Health of the Russian Federation <i>M.A. Murashko</i>	411
Speech by the General Director of the State Corporation “Rosatom” <i>A.E. Likhachev</i>	412
<i>R. I. Ilkaev, L. D. Ryabev</i> Academy of Sciences and the Atomic Project in the USSR	414
<i>V. E. Fortov, R. I. Ilkaev, G. N. Rykovanov, V. D. Selemir, B. Yu. Sharkov</i> Explosions, powerful shock waves and extreme states of substance	422
<i>S. G. Garanin, S. V. Garnov, A. M. Sergeev, E. A. Khazanov</i> High-power lasers for high-energy density physics	435
<i>S. N. Lebedev, B. N. Chetverushkin, R. M. Shagaliev</i> Computing and information technologies in the nuclear industry	446
<i>E. O. Adamov, V. G. Asmolov, L. A. Bolshov, V. K. Ivanov</i> Two-component nuclear power	450
<i>B. F. Myasoedov, S. N. Kalmykov, A. Yu. Shadrin</i> Chemical technologies of nuclear fuel cycle closure	459
<i>E. P. Velikhov, V. I. Ilgisonis</i> Prospects for thermonuclear research	470
<i>A. V. Dub, A. I. Rudskoy</i> New materials for nuclear power	479
<i>N. N. Ponomarev-Stepnoy</i> Atomic-hydrogen energy	484

Official Section

Awards and prizes	499
-------------------	-----

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

СИНТЕЗ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ЗАВТРАШНЕГО ДНЯ

DOI: 10.31857/S086958732105025X

В 2020 г. российской атомной промышленно-сти исполнилось 75 лет. Празднование юбилея началось 20 августа (именно в этот день 1945 г. вышло постановление ГКО о создании Первого главного управления при Совете народных комиссаров СССР для руководства Атомным проектом), а завершилось декабрьской научной сессией Общего собрания членов РАН, посвящённой результатам и перспективам сотрудничества Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом” и Академии наук. В мероприятии очно и онлайн приняли участие более 1000 человек.

К участникам сессии с приветствием обратились Президент России **В.В. Путин**, заместитель председателя Правительства РФ **Д.Н. Чернышенко**, министр здравоохранения РФ **М.А. Мурашко**.

Генеральный директор Госкорпорации “Росатом” **А.Е. Лихачёв** в приветственном выступлении отметил: “75-летний юбилей атомной промышленности – это наш общий с вами праздник, ведь в становлении и развитии советского Атомного проекта огромная роль принадлежит выдающимся учёным Академии наук. Именно их трудом был создан тот базис, на котором потом выросла вся атомная отрасль”. Достаточно вспомнить, что основной научный центр Атомного проекта – Лаборатория № 2 – был академическим учреждением. Институты и лаборатории Академии наук, по признанию руководителя “Росатома”, занимали в структуре этого проекта ключевые позиции, отвечая за научное обеспечение программных задач.

В прозвучавшем затем докладе почётного научного руководителя РФЯЦ–ВНИИЭФ академика РАН **Р.И. Ильяева** и заместителя директора РФЯЦ–ВНИИЭФ **Л.Д. Рябева** приводились примеры научно-технического и кадрового обеспечения Академией наук работ по атомному и водородному оружию в СССР, отмечался выдающийся вклад учёных АН СССР в создание отечественного ядерного и термоядерного оружия.

Представители академического и отраслевого сообщества использовали юбилей как повод рассказать широкой общественности не столько об истории, сколько о сегодняшнем дне, пожалуй, самой наукоёмкой отрасли страны и партнёрских отношениях двух организаций. Научная сессия проходила в тот момент, когда “Росатом” работал

с аппаратом Правительства РФ и министерствами, оттачивая и корректируя отдельные формулировки и положения подготовленной в кооперации с РАН программы “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии на период до 2024 года (РТТН)”¹. Поэтому программа сессии была выстроена таким образом, чтобы большая аудитория слушателей и зрителей (прямую трансляцию Общего собрания членов РАН вёл портал “Научная Россия”) получила исчерпывающий ответ на вопрос, чем в ближайшие годы займутся четыре крупных научно-производственных комплекса госкорпорации: предприятия ядерного топливного цикла, атомного машиностроения, ядерного оружейного комплекса, отраслевые научно-исследовательские институты и единственный в мире атомный ледокольный флот, а также на каких направлениях будет строиться стратегическое сотрудничество “Росатома” и Академии наук.

На сессии были представлены доклады по всему спектру научных исследований и разработок, сформулированных в программе РТТН, которые могут обеспечить и закрепить лидерство России в атомной и термоядерной энергетике:

- изучение вещества в экстремальных условиях – одна из наиболее актуальных и интенсивно развивающихся фундаментальных научных дисциплин, находящихся на стыке физики плазмы, нелинейной оптики, конденсированного состояния, ядерной, атомной и молекулярной физики, релятивистской и магнитной гидродинамики (авторы доклада академики РАН **В.Е. Фортов**, **Р.И. Ильяев**, **Г.Н. Рыкованов**, член-корреспондент РАН **В.Д. Селемир**, академик РАН **Б.Ю. Шарков**);

- исследования по лазерной физике и физике высоких плотностей энергии, проекты создания перспективной экспериментальной лазерной базы (авторы доклада академик РАН **С.Г. Гаранин**, член-корреспондент РАН **С.В. Гарнов**, академики РАН **А.М. Сергеев** и **Е.А. Хазанов**);

¹ 4 февраля 2021 г. премьер-министр страны М.В. Мишустин на рабочей встрече с главой “Росатома” А.Е. Лихачёвым официально объявил о том, что Правительство РФ утвердило комплексную программу РТТН, ставшую, по сути, 14-м национальным проектом.

- вычислительные и информационные технологии, широко используемые при проектировании ядерных реакторов, исследовании свойств материалов, в том числе их радиационной стойкости, изучении вопросов ядерной безопасности, моделировании процессов лазерного термоядерного синтеза (авторы доклада член-корреспондент РАН **С.Н. Лебедев**, академик РАН **Б.Н. Четверушкин**, доктор физико-математических наук **Р.М. Шагалиев**);

- стратегия развития двухкомпонентной ядерной энергетики, предполагающая наряду с технологиями, использующими открытый ядерный топливный цикл и реакторы на тепловых нейтронах, выстраивание новой ветви ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах при замкнутом ядерном топливном цикле (авторы доклада доктора технических наук **Е.О. Адамов**, **В.Г. Асмолов**, академик РАН **Л.А. Большов** и член-корреспондент РАН **В.К. Иванов**);

- химические технологии замыкания топливного цикла, которые минимизируют радиоактивные отходы и позволяют решать как экологическую, так и экономическую задачу — уход от глубинного захоронения долгоживущих радионуклидов к их трансмутации с последующим приповерхностным захоронением короткоживущих радионуклидов (авторы доклада академик РАН **Б.Ф. Мясоедов**, член-корреспондент РАН **С.Н. Калмыков**, доктор химических наук **А.Ю. Шадрин**);

- перспективы термоядерных исследований в первой половине XXI в., способных выступать и уже выступающих мощным драйвером научно-технологического прогресса, механизмом, стимулирующим развитие высокотехнологичных сегментов экономики страны, и возможным элементом ядерной энергетики будущего (авторы доклада академик РАН **Е.П. Велихов**, доктор физико-математических наук **В.И. Ильгисонис**);

- новые материалы, современные материаловедческие и технологические подходы для обеспечения безопасности и экономической эффективности эксплуатации ядерно-энергетических установок нового поколения (авторы доклада доктор технических наук **А.В. Дуб** и академик РАН **А.И. Рудской**);

- перспективы создания крупномасштабной атомно-водородной энергетики с соответствующей инфраструктурой поставки водорода на внутренний и внешний рынок (автор доклада академик **Н.Н. Пономарёв-Степной**);

- развитие морской и космической ядерной энергетики, атомных станций малой мощности (авторы доклада академик РАН **А.А. Саркисов** и

содокладов член-корреспондент РАН **Ю.Г. Драгунов** и доктор технических наук **В.В. Петрунин**);

- развитие ядерной медицины — медицинской диагностики и лучевой терапии, применяемой при лечении онкологических, кардиологических и неврологических заболеваний (авторы доклада академики РАН **А.Д. Каприн** и **В.П. Смирнов**);

- развитие радиологии и радиационной медицины для защиты от воздействия ионизирующих излучений (авторы доклада академик РАН **Л.А. Ильин** и член-корреспондент РАН **А.С. Самойлов**).

Участники сессии особо подчеркнули, что установившиеся партнёрские отношения и совместная деятельность Госкорпорации “Росатом” с РАН, несомненно, упрочат лидерские позиции отечественной атомной отрасли в мире и позволят создать новые технологии, которые сформируют будущий облик атомной отрасли России.

Гуманитарно-социальная составляющая сессии была представлена докладами академиков РАН **А.Г. Арбатова** и **С.М. Рогова**, в которых дан анализ сложившейся на сегодняшний день ситуации в области контроля над атомными вооружениями.

Министр науки и высшего образования РФ **В.Н. Фальков**, завершавший сессию, назвал наиболее удачные примеры взаимодействия Академии наук и министерства: реализация масштабных проектов по развитию научной инфраструктуры, к которым в первую очередь относится создание под Новосибирском Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ) — установки класса мегасайнс, выполнение мероприятий, направленных на обновление приборной базы ведущих организаций, экспертное обеспечение деятельности государственных органов и организаций, в том числе научно-технических программ и проектов, формирование Программы фундаментальных научных исследований на долгосрочный период (2021–2035 годы), разработанной Российской академией наук при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. “Это важная совместная работа, результаты которой проявятся уже в ближайшее время”, — заключил **В.Н. Фальков**.

Свыше 50 членов Академии наук, плодотворно занимающихся атомной тематикой, многочисленные сотрудники научных и отраслевых институтов РАН и “Росатома” были награждены юбилейной медалью “75 лет атомной отрасли России”, десятки учёных получили Благодарность Российской академии наук.

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”**

**ПРИВЕТСТВИЕ ПРЕЗИДЕНТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
В.В. ПУТИНА УЧАСТНИКАМ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

DOI: 10.31857/S0869587321050200

Уважаемые друзья! Приветствую вас на Общем собрании членов Российской академии наук, посвящённом 75-летию отечественной атомной отрасли.

Создание и становление атомной промышленности стало большим, по-настоящему значимым событием в истории нашей страны, которое во многом определило эффективное развитие науки, экономики, оборонно-промышленного комплекса, энергетики, здравоохранения, способствовало достижению ракетно-ядерного паритета, обеспечению национальной безопасности государства. Отмечу, что столь выдающиеся успехи стали возможны благодаря таланту и творческому гению отцов-основателей атомного проекта — академиков И.В. Курчатова, Ю.Б. Харитона, Я.Б. Зельдовича, А.Д. Сахарова, других прослав-

ленных учёных, их плодотворному, конструктивному взаимодействию со специалистами атомной отрасли.

Отрадно, что вы бережно храните трудовые традиции всех поколений предшественников, их уникальное интеллектуальное, научное наследие. Сегодня крайне важно активно участвовать в решении масштабных общенациональных задач, наращивать фундаментальные исследования по приоритетам научно-технологического развития страны.

Уверен, что нынешнее собрание пройдёт на достойном уровне, позволит вам обменяться позитивным опытом, наметить планы на будущее. Желаю вам всего наилучшего.

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”**

**ПРИВЕТСТВЕННЫЙ АДРЕС ЗАМЕСТИТЕЛЯ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ
ПРАВИТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Д.Н. ЧЕРНЫШЕНКО**

DOI: 10.31857/S0869587321050042

Сегодня Россия – мировой лидер по количеству энергоблоков, сооружаемых за рубежом. Российский атом – это производство стабильной электроэнергии, радиоизотопов для лечения онкологических заболеваний; это прорывные научные открытия, освоение Арктики и много другое. Атомная промышленность – это около 400 предприятий, где трудятся более 250 тысяч человек.

Даже самая сложная задача для российских атомщиков – лишь новый вызов, поэтому сегодня атомная отрасль находится на передовой самых важных для страны направлений: создание

суперкомпьютеров, производство композитных материалов, организация системы переработки опасных промышленных отходов, разработка ядерных двигателей для космических миссий и многое другое.

Совместная научно-техническая и инновационная деятельность ГК “Росатом” и РАН – важная составляющая устойчивого роста и развития атомной промышленности.

От лица Правительства желаю всем плодотворной работы и новых достижений!

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”**

**ВСТУПИТЕЛЬНОЕ СЛОВО ПРЕЗИДЕНТА РАН
АКАДЕМИКА РАН А.М. СЕРГЕЕВА**

Поступила в редакцию 08.12.2020 г.

После доработки 15.12.2020 г.

Принята к публикации 19.12.2020 г.

DOI: 10.31857/S0869587321050236

В нашей стране атомная отрасль выросла из достижений фундаментальной науки в первой половине XX в., когда бурно развивались квантовая механика, ядерная физика, теория относительности. Творцы этой великой науки не представляли, насколько радикально их открытия изменят жизнь на планете.

Но всё изменилось в конце 1938 г., когда в печать была направлена статья немецких учёных О. Гана и Ф. Штрассмана относительно эксперимента деления ядра атомов урана при бомбардировке медленными нейтронами. Оказалось, что энергия вылетающих частиц гораздо больше той, что приводила к делению атома урана. Эта энергия, как все быстро поняли, обусловлена разрывом внутриядерных связей. Так был экспериментально открыт новый источник колоссальной энергии. Впереди замаячили и новая энергетика, и новые виды оружия.

Задолго до этого события в ленинградском Радиевом институте и в Физтехе под руководством академика А.Ф. Иоффе велись работы по изучению атомного ядра. Они резко активизировались, когда в 1942 г. вышло постановление Госкомитета обороны СССР, которое обязывало Академию наук и лично А.Ф. Иоффе организовать лабораторию атомного ядра. В 1943 г. такая лаборатория была сформирована под названием Лаборатория № 2 АН СССР. Её руководителем стал Игорь Васильевич Курчатов. А в августе 1945 г., после атомной бомбардировки американцами двух японских городов, вышло закрытое постановление Государственного комитета обороны о создании особого органа для руководства всеми работами по использованию атомной энергии урана, включая производство бомбы. Лаборатория № 2 превратилась в мощную научную организацию, при которой в 1946 г. в Сарове было создано Конструкторское бюро № 11 (КБ-11). В 1949 г. Лабораторию № 2 переименовали в Лабораторию измерительных приборов АН СССР, в 1960 г. — в Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова АН СССР, который сегодня известен как Нацио-

нальный исследовательский центр “Курчатовский институт”.

Таким образом, мы можем с гордостью сказать, что Академия наук была колыбелью атомной отрасли в нашей стране. Академия внесла огромный вклад в её развитие, обеспечивая фундаментальные заделы и непосредственное участие своих членов в работах на атомных объектах. Все помнят имена академиков И.В. Курчатова, Ю.Б. Харитона, Я.Б. Зельдовича, И.Е. Тамма, А.Д. Сахарова, Н.Н. Боголюбова. И, конечно, нельзя забывать о работе десятков академических институтов по программе атомной отрасли. Важно упомянуть, что из девяти участников Атомного проекта — трижды Героев Социалистического Труда восемь были членами Академии наук СССР. А ещё девять членов АН, участвовавших в Атомном проекте, стали дважды Героями Социалистического Труда, 51 учёный был удостоен звания Героя Социалистического Труда или Героя Труда Российской Федерации.

Взаимодействие Академии наук с атомной отраслью всегда было плотным и плодотворным, в какой бы организационной форме атомная отрасль ни существовала. В 1953 г. был образован Минсредмаш СССР, в 1992 г. — Федеральное агентство по атомной энергии РФ, а в 2007 г. — Госкорпорация “Росатом”, вместе с которой мы сегодня проводим научную сессию.

Сотрудничество с “Росатомом” развивается по многим направлениям, прежде всего это внедрение фундаментальных достижений в практические разработки. Чтобы не быть голословным, приведу конкретный пример. Как вы знаете, ускорительная проблематика активно разрабатывалась в том числе в Сибири — в Институте ядерной физики, и к началу 1960-х годов на основе фундаментальных экспериментальных исследований были созданы ускорители, которые оказались чрезвычайно востребованными атомной отраслью для создания средств радиографии. Чтобы изучать быстротекающие процессы в плотных веществах, необходимо использовать излучение рентгеновского диапазона частот, причём это из-

лучение должно быть достаточно жёстким и короткоимпульсным. Это достижение фундаментальной науки было подхвачено и реализовано атомной отраслью для решения чрезвычайно важной задачи – мониторинга процессов, связанных с развитием быстропротекающих ядерных реакций. Другой общеизвестный пример – изобретение лазеров. Первый лазер был создан в 1960 г., до этого развивались работы по изучению индуцированного излучения, в 1964 г. состоялось вручение Нобелевской премии в этой области. Это было фундаментальное открытие нового природного явления, причём учёные довольно быстро предложили способы использования гигантской концентрации энергии в лазерном луче для создания лазерного термояда. Впоследствии эти достижения атомной отрасли позволили в условиях полного запрета на ядерные испытания проводить диагностику процессов, которые развиваются во время детонации ядерных зарядов.

Аналогичные примеры применения достижений фундаментальной науки есть и в смежных областях. Нельзя не упомянуть радиохимию, выдающиеся результаты наших химиков в области выделения чистых изотопов, что оказалось важным и для атомной отрасли, и при создании радиофармпрепаратов.

Когда мы говорим о взаимодействии академической науки и атомной отрасли, следует иметь в виду, что это взаимодействие не только институциональное, но и межличностное. Выдающиеся деятели атомной отрасли избираются в члены академии, входят в её научные советы, а в Научно-техническом совете “Росатома” много членов РАН. Символом этой тесной связи можно назвать академика Анатолия Петровича Александрова, который долгие годы был директором Института атомной энергии им. И.В. Курчатова и одновременно президентом Академии наук СССР.

Наверное, главное достижение атомной отрасли состоит в том, что мы уже 75 лет живём в мире. Именно решения, принятые в СССР относительно организации атомной промышленности, обеспечили нам мир в течение столь длительного времени. Сейчас перед атомной отраслью ставятся и другие задачи. Основная из них – уже не сохранение военного паритета (он достигнут, и мы его будем поддерживать), а обеспечение паритета в научно-технологической сфере. Если мы его не добьёмся, то рискуем остаться на обочине развития мировой цивилизации. С этой точки зрения сотрудничество Российской академии наук и “Росатома” – путь к достижению такого паритета.

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”**

**ВЫСТУПЛЕНИЕ МИНИСТРА НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ В.Н. ФАЛЬКОВА**

Поступила в редакцию 08.12.2020 г.

После доработки 15.12.2020 г.

Принята к публикации 19.12.2020 г.

DOI: 10.31857/S086958732105008X

Прежде всего хочу поблагодарить за приглашение на это значимое мероприятие – Научную сессию Общего собрания членов РАН, посвящённую 75-летию атомной промышленности. Министерство науки и высшего образования РФ внимательно следит за повесткой, которую формирует и реализует Академия наук, и сегодня, в преддверии 2021 г., мы можем подвести предварительные итоги нашей совместной деятельности. Хотя 2020 год оказался непростым в силу эпидемии коронавируса, кадровых изменений, состоявшихся в министерстве, тем не менее он был плодотворным.

Хочу поблагодарить членов Академии наук за участие в реализации государственной программы “Научно-технологическое развитие Российской Федерации” на 2018–2025 годы и Национального проекта “Наука”. Мы часто дискутируем с вами и, бывает, недовольны результатами, принятыми решениями, иногда стратегического характера, но вместе с тем у нас много удачных примеров сотрудничества.

В первую очередь речь идёт о масштабных проектах, которые не могли быть реализованы без участия РАН, Сибирского, Уральского и Дальневосточного её отделений. К ним, например, относится создание под Новосибирском, в наукограде Кольцово, Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ) – установки класса мегасайнс, которую планируется построить к 2024 г. Она станет значимой частью научной инфраструктуры страны.

Отмечу также совместную работу РАН и министерства по реализации мероприятий, направленных на обновление приборной базы ведущих организаций, выполняющих научные исследования и разработки, в рамках федерального проекта “Развитие передовой инфраструктуры для проведения исследований и разработок в РФ”. Благодаря консультациям с Академией наук проект

изменил свой формат и получил новый импульс для развития.

Хочу выразить особую благодарность академикам, членам-корреспондентам РАН, профессорам РАН за экспертное обеспечение деятельности государственных органов и организаций, в том числе научно-технических программ и проектов.

Замечу, что в 2020 г., в непростое время, состоялось несколько больших конкурсов. Один из них – конкурс крупных проектов по проведению фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым президиумом РАН, – так называемые 100-миллионники. Каждый из отобранных по результатам конкурса проектов получил финансирование в размере до 100 млн руб. Конечно, не все остались довольны итогами отбора, но важно другое: мы запустили в работу несколько десятков крупных научных проектов. Кроме того, в рамках федерального проекта “Развитие научной и научно-производственной кооперации” национального проекта “Наука” мы отобрали вместо трёх 10 научных и 5 научно-образовательных центров мирового уровня, где будет решаться задача интеграции науки и высшего образования, их кооперация с предприятиями, действующими в реальном секторе экономики.

Научную сессию, посвящённую 75-летию атомной промышленности, Академия наук проводит совместно с Госкорпорацией “Росатом”. В связи с этим я хочу поблагодарить исследователей академической науки за вклад в становление и развитие атомной отрасли. В 2020 г. по инициативе “Росатома” при участии Министерства науки и высшего образования РФ и РАН была подготовлена комплексная программа “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года”, которую часто называют от-

дельным национальным проектом. Она уже получила нормативное оформление и поддержку на самом высоком политическом уровне.

Отмечу ещё один важный рабочий момент. В 2020 г. завершилась Программа фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы. На выходе – новая Программа фундаментальных научных исследований на долгосрочный период (2021–2035 годы), которую разработала Российская академия наук

при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Это тоже важная совместная работа, результаты которой ожидаются уже в ближайшее время.

В завершение хотел бы пожелать присутствующим в этом зале и тем, кто участвует в работе дистанционно, здоровья, счастья и благополучия. Рассчитываю на конструктивное, содержательное и плодотворное сотрудничество с Российской академией наук в будущем.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

ВЫСТУПЛЕНИЕ МИНИСТРА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РФ М.А. МУРАШКО

Поступила в редакцию 08.12.2020 г.

После доработки 15.12.2020 г.

Принята к публикации 19.12.2020 г.

DOI: 10.31857/S0869587321050169

Научная сессия Общего собрания членов РАН, проводимая совместно с Госкорпорацией “Росатом”, посвящена 75-летию атомной отрасли. Можно без преувеличения сказать, что атомная отрасль – визитная карточка нашей страны, область, в которой Россия, а ранее – Советский Союз занимали и занимают лидирующие позиции в мире. Напомню, что ядерные технологии – это не только энергетика, судостроение и другие отрасли промышленности, но и медицина.

Сегодня в мире активно развивается сектор ядерной медицины – одно из наиболее высокотехнологичных и наукоёмких направлений в практическом здравоохранении. Ядерная медицина позволяет поднять на новый уровень и диагностику, и лечение ряда заболеваний, прежде всего онкологических, борьба с которыми входит в перечень национальных приоритетов, обозначенных Президентом России. Для развития этой сферы необходим мультидисциплинарный подход и скоординированная работа врачей, физиков, техников, химиков. В системе Минздрава РФ такая работа налажена. Осуществляется тесное взаимодействие профильных подведомственных учреждений с учёными и разработчиками из академических и отраслевых институтов, входящих в состав Госкорпорации “Росатом”. Уверен, что совместная работа в формате многопрофиль-

ных команд позволит Российской Федерации сделать успешный технологический рывок в этом направлении, а высокие научные компетенции – занять олимп знаний, предлагая российским гражданам самые современные методы диагностики и лечения, а также новые радиофармацевтические препараты.

Хочу отметить, что Министерство здравоохранения РФ подготовило приказ по развитию технологий ядерной медицины.

Два доклада на научной сессии посвящены медицинской тематике. Это свидетельствует о значительном интересе атомной отрасли к данному направлению и вселяет уверенность в том, что ядерная медицина в России получит столь необходимую научную поддержку. Речь идёт не только о технической, но и об организационной поддержке. Госкорпорация “Росатом” и Академия наук активно содействуют формированию прорывных технологий в здравоохранении.

Желаю участникам научной сессии интересной плодотворной работы и выражаю надежду на продолжение сотрудничества сектора здравоохранения с Российской академией наук и “Росатомом” в области ядерной медицины и лучевой терапии в интересах российских граждан, которые должны получать медицинскую помощь на самом высоком уровне.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

ВЫСТУПЛЕНИЕ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА
ГОСКОРПОРАЦИИ “РОСАТОМ” А.Е. ЛИХАЧЁВА

Поступила в редакцию 21.01.2021 г.

После доработки 21.01.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

DOI: 10.31857/S0869587321050157

Академию наук не без оснований можно назвать колыбелью атомной отрасли. Благодаря труду выдающихся советских учёных удалось создать базис, который позволил решить проблему защиты суверенитета Советского Союза, Российской Федерации и к настоящему времени обеспечить лидирующее положение российских неоружейных технологий на глобальном рынке.

В нашей стране начало системным работам по радиоактивности было положено исследованиями академика В.И. Вернадского и созданием Радиевого института в 1922 г. В 1937 г. построен первый в Европе циклотрон. Протонно-нейтронная модель ядра, предложенная Д.Д. Иваненко, открытие спонтанного деления урана Г.Н. Флёрвым и К.А. Петраком, явления ядерной изомерии брома И.В. Курчатовым, Б.В. Курчатовым, Л.И. Русиновым, Л.В. Мысовским, открытие эффекта, названного в честь его первооткрывателей П.А. Черенкова и С.И. Вавилова, пионерные работы по искусственному делению ядер, другие значительные достижения советских учёных способствовали тому, что в канун Великой Отечественной войны в стране имелся масштабный задел в области физики ядра.

Работы по урану, но уже в военной сфере, также начались в Академии наук, когда в 1943 г. была организована Лаборатория № 2 АН СССР – ныне всемирно известный НИЦ “Курчатовский институт”. Члены Академии наук внесли решающий вклад в обеспечение ядерного паритета, создание ракетно-ядерного щита и безопасности страны. И.В. Курчатов, Ю.Б. Харитон, Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров, К.И. Шёлкин, Е.И. Забабахин работали над ядерным оружием. С.П. Королёв, М.В. Келдыш, А.Н. Туполев, С.В. Ильюшин, А.С. Яковлев, В.Н. Челомей создавали реактивную авиацию и ракетную технику. С рождением атомного подводного и ледокольного флота навсегда связаны имена А.П. Александрова, Н.А. Доллежала, Н.С. Хлопкина. Из девяти участников атомного проекта, трижды удостоенных звания Героя Социалистического Труда, восемь являлись членами АН СССР: И.В. Курчатов, Ю.Б. Харитон, А.П. Александров, М.В. Келдыш, Н.Л. Духов, Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров и К.И. Шёлкин.

Великой заслугой советских учёных, прежде всего И.В. Курчатова, было умение подняться выше исключительно военного характера использования атомных технологий. Решая задачи обеспечения безопасности, они одновременно смогли в буквальном смысле заглянуть в будущее, нашли пути мирного использования атомной энергии. И.В. Курчатов, Д.И. Блохинцев, Н.А. Доллежал стали создателями первой в мире атомной станции в Обнинске, введённой в строй в 1954 г. Все замечательные достижения эпохи Минсредмаша СССР – оборонный ядерный потенциал и атомная энергетика, уранодобыча и атомный ледокольный флот – результат тесного сотрудничества с Академией наук. В этой связи нельзя не упомянуть Е.П. Славского, возглавлявшего Министерство среднего машиностроения СССР с 1957 по 1986 г. По мнению его коллег, он всегда бережно и уважительно относился к учёным, отвергал командные методы в науке, лично вмешивался в конфликты, если таковые случались между руководством отрасли и учёными. “В нашем министерстве своя Академия наук”, – говорил он с гордостью, имея в виду, что в отрасли работали несколько десятков академиков и членов корреспондентов АН СССР.

1960–1970-е годы справедливо называют годами расцвета советского атомного проекта. В 1964 г. был пущен первый блок ВВЭР–210 на Нововоронежской АЭС, что стало событием для атомной отрасли. На основе водо-водяных энергетических реакторов удалось создать шесть моделей энергоблоков с реакторами разной мощности и в их числе ставшие знаменитыми в мире ВВЭР–1200 поколения “3+” – главный экспортный продукт “Росатома” на современном этапе.

В конце 1950-х годов начались масштабные исследования в области термоядерной энергии. В результате в Советском Союзе была создана серия установок “Токамак” (это слово вошло во все мировые научные глоссарии). Параллельно шли работы по реакторам на быстрых нейтронах, увенчавшиеся запуском в 1973 г. первого реактора БН–350 в г. Шевченко (ныне Акатау) в Казахстане. Благодаря сотрудничеству с научными цен-

трами и институтами академии отечественная атомная отрасль стала одним из мировых лидеров в области проектирования и строительства энергетических и исследовательских реакторов, обогатительных технологий и способов получения ядерного топлива.

Мощный импульс развитию отрасли, а значит, и укреплению связей с академической наукой, придало решение Президента РФ в 2007 г. о создании государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”. С первых дней существования большое внимание в корпорации уделяется развитию научных исследований. Российские физики из институтов “Росатома”, НИЦ “Курчатовский институт”, РАН, ОИЯИ и ведущих университетов страны участвуют в крупнейшем международном проекте ИТЭР. В сотрудничестве с Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики РАН реализована программа повышения надёжности атомных станций. Совместно с НИЦ “Курчатовский институт” выполнены задачи первого этапа федеральной целевой программы “Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года” и сняты с повестки дня такие острые вопросы, как разгрузка пристанционных хранилищ отработанного ядерного топлива, консервация озера Карачай, изоляция Теченского каскада. Создана технология приведения в безопасное состояние уран-графитовых реакторов.

Ведущие учёные РАН возглавляют ключевые направления развития “Росатома”. Академик Н.Н. Пономарёв-Степной ведёт тему атомно-водородной энергетики. Академик В.П. Смирнов развивает технологии ядерной медицины и осуществляет научное руководство “Высшей школой физики”. Академик Г.Н. Рыкованов – председатель научно-технического совета корпорации. Все они, а также академики Р.И. Илькаев, А.Ю. Румянцев входят в состав отраслевого Комитета по науке и во многом определяют приоритетные направления научно-технологического развития отрасли. Не могу не отметить неоценимый вклад Л.Д. Рябёва и Ю.А. Трутнева в поддержание ядерного щита нашей страны.

Сегодня перед “Росатомом” стоят новые масштабные задачи. Большая их часть нашла отражение в комплексной программе “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в РФ на период до 2024 года”. Фактически это 14-й национальный проект не только по масштабу и содержанию, но и по форме управления. Значительные силы предполагается сосредоточить на реализации двухкомпонентной ядерной энергетики и замыкания топливного цикла. К работам по таким направлениям, как управляемый термоядерный синтез, водородная энергетика, разработка новых материалов, будут привлечены учёные институтов РАН, базовых вузов “Росатома”. Только сообще-

ща мы можем обеспечить научный и технологический прогресс в этих областях.

Несмотря на то, что программа ориентирована в основном на проведение прикладных исследований и разработок, мы включили в неё ряд вопросов, входящих в сферу внимания фундаментальной науки. В их числе синтез сверхтяжёлых элементов, физика высоких плотностей энергии. Эти разделы науки ресурсоёмки, требуют немалых вложений, но мы в “Росатоме” понимаем, что работы в области фундаментальной физики впоследствии могут дать начало новым энергетическим и сопутствующим технологиям.

Не могу не поделиться с вами важнейшей новостью. Во время недавнего визита в Саров Президент РФ одобрил нашу инициативу о создании на базе ВНИИЭФ Национального центра физики и математики, открытия там филиала МГУ им. М.В. Ломоносова. По сути речь идёт об академгородке нового типа. В Центре будут организованы исследования по широкому кругу проблем современной науки, включая “новую физику”, предусмотрено строительство электрон-позитронного коллайдера. Национальный центр физики и математики призван стать полем взаимодействия учёных и специалистов академических институтов, вузов, включая НИЯУ МИФИ, образовательный центр “Сириус”. В составе участников осуществления проекта – Российская академия наук, госкорпорация “Росатом”, НИЦ “Курчатовский институт”, МГУ им. М.В. Ломоносова, Правительство РФ. Считаю, что будущий центр станет не только своеобразной меккой российских атомщиков, но и точкой притяжения учёных, молодых специалистов со всей страны.

Нельзя не отметить, что мы нуждаемся в серьёзной поддержке со стороны РАН в работах по перспективным направлениям. В их числе цифровые, квантовые, лазерные технологии, искусственный интеллект, разработка новых материалов. Объединение усилий предполагает и национальный экологический проект. Требуется, например, серьёзная профессиональная экспертиза предлагаемых технологий нейтрализации накопленных опасных отходов производства в Усолье Сибирском Иркутской области, а также на Байкальском целлюлозно-бумажном комбинате, где отходы складированы в непосредственной близости от озера Байкал.

Буквально на днях мы обсуждали создание научного центра для изучения проблем Арктики, где перед нами стоят задачи, сопоставимые по значимости с поддержанием ядерного оружейного комплекса и развитием энергетики. Освоение этого экологически хрупкого региона может быть эффективным только при соответствующей серьёзной научной оценке.

Такова амбициозная повестка на сегодня и завтра. Уверен, что наша совместная научная сессия откроет новые горизонты кооперации “Росатома” и Академии наук на годы и десятилетия вперёд.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

АКАДЕМИЯ НАУК И АТОМНЫЙ ПРОЕКТ В СССР

© 2021 г. Р. И. Илькаев^{а,*}, Л. Д. Рябев^{а,**}

^аРоссийский федеральный ядерный центр
“Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики”, Саров, Россия

*E-mail: ilkaev@vniief.ru

**E-mail: LMKondratenkova@rosatom.ru

Поступила в редакцию 25.01.2021 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 22.02.2021 г.

В статье обсуждается вклад Академии наук СССР в реализацию Атомного проекта. Приводятся примеры научно-технического и кадрового обеспечения Академией наук работ по атомному и водородному оружию в СССР. Отмечается выдающийся вклад учёных АН СССР в создание ядерного и термоядерного оружия нашей страны. Подчёркивается необходимость тесного сотрудничества учёных Российской академии наук и Государственной корпорации “Росатом”.

Ключевые слова: атомный проект, Академия наук СССР, физика высоких плотностей энергии, ядерная физика, РАН, вычислительная математика.

DOI: 10.31857/S0869587321050121

О существовании атомного проекта в США И.В. Сталину доложили в начале 1942 г., и он подписал распоряжение об организации в СССР работ по урану. Спустя почти три с половиной года, сразу же после встречи руководителей СССР, США и Великобритании на Потсдамской конференции, где 24 июля 1945 г. Г. Трумэн сообщил И.В. Сталину, что у США “теперь есть оружие необыкновенной разрушительной силы”, руководство нашей страны приняло решение о реализации Атомного проекта СССР (встреча в Потсдаме

состоялась ещё до того, как Хиросима подверглась бомбардировке урановым зарядом с пушечным сближением и Нагасаки плутониевым зарядом со сферической имплозией).

Следует отметить, что в нашей стране работы по урану имеют богатую историю и начались гораздо раньше 1942 г. Выдающиеся научные и технологические достижения Атомного проекта базировались на прочном фундаменте отечественной физики, заложенном в 1920–1930-е годы, и определялись высоким уровнем советских исследований, в числе которых: развитие теории атомного ядра, открытие ядерных изомеров и спонтанного деления урана, постройка первого в Европе циклотрона, развитие физики процессов детонации взрывчатых веществ. О внимании к этой области науки говорит и создание в стране сети физических, в том числе физико-технических, институтов, а также Комиссии по атомному ядру АН СССР. С 1933 по 1940 г. были проведены пять всесоюзных конференций с международным участием по ядерной физике.

В предвоенные десятилетия новые научные центры появились в нескольких городах. В Петрограде в 1918 г. был основан Рентгенологический и радиологический институт, позднее, в 1921-м, – Физико-технический, в 1922-м – Радиевый. 1928-й стал годом основания Харьковского физико-технического института, а 1931-й – Ин-



ИЛЬКАЕВ Радий Иванович – академик РАН, почётный научный руководитель РФЯЦ–ВНИИЭФ.
РЯБЕВ Лев Дмитриевич – заместитель директора РФЯЦ–ВНИИЭФ.



Рис. 1. А.Ф. Иоффе со своими учениками А.И. Алихановым и И.В. Курчатовым в лаборатории ЛФТИ. 1935 г.

ститута химической физики в Ленинграде (в 1943 г. переведён в Москву). В 1931 г. в Москве был создан Институт редких металлов, в 1932-м – Физический институт (с декабря 1934 г. носит имя П.Н. Лебедева), а в 1934-м – Институт физических проблем. В 1938 г. в АН СССР была образована Комиссия по атомному ядру, а в 1940 г. – Комиссия по проблемам урана (в её состав вошли Н.Н. Семёнов, И.В. Курчатов, Ю.Б. Харитон) [1].

А.Ф. Иоффе ещё в 1940 г. предвидел, кто персонально станет научно-техническими лидерами Атомного проекта СССР (рис. 1). В записке, направленной в президиум АН СССР 24 августа того года, он отметил, что “возможность технического использования энергии урана нельзя считать исключённой при настоящем состоянии наших знаний... основными специалистами, к которым прежде всего следует обратиться, являются: И.В. Курчатов и его сотрудники Флёров и Петржак (ЛФТИ), Зельдович и Харитон (ЛИХФ). Общее руководство всей проблемы в целом следовало бы поручить И.В. Курчатову как лучшему знатоку вопроса, показавшему на строительстве циклотрона выдающиеся организационные способности” [1].

28 сентября 1942 г. Государственный Комитет Оборона своим распоряжением № 2352сс “Об организации работ по урану” определил основные задачи Академии наук в области ядерных исследований.

«Обязать Академию Наук СССР (акад. Иоффе) возобновить работы по исследованию осуществимости использования атомной энергии пу-

тём расщепления ядра урана и предоставить Государственному Комитету Оборона к 1-му апреля 1943 года доклад о возможности создания урановой бомбы или уранового топлива.

Для этой цели:

1. Президиуму Академии Наук СССР:

а) организовать при Академии Наук специальную лабораторию атомного ядра;

б) к 1-му января 1943 года в институте радиологии разработать и изготовить установку для термодиффузионного выделения урана-235;

в) к 1-му марта 1943 года в институте радиологии и физико-техническом институте изготовить методами центрифугирования и термодиффузии уран-235 в количестве, необходимом для физических исследований, и к 1-му апреля 1943 года провести в лаборатории атомного ядра исследования осуществимости расщепления ядер урана 235.

2. Академии Наук УССР (акад. Богомолец) организовать под руководством проф. Ланге разработку проекта лабораторной установки для выделения урана-235 методом центрифугирования и к 20 октября 1942 года сдать технический проект казанскому заводу “Серп и молот” Наркомата тяжёлого машиностроения» [1].

Одним из организаторов физических исследований в СССР выступил академик А.Ф. Иоффе (1880–1960) – создатель и директор Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ), ставшего базовой организацией для образования сети физико-технических институтов в стране и

развёртывания работ в различных областях физики, активный участник первых стадий Атомного проекта, член технического совета Спецкомитета. Его школу прошли выдающиеся научно-технические руководители Атомного проекта: А.П. Александров, А.И. Алиханов, Л.А. Арцимович, И.К. Кикоин, И.В. Курчатов, Б.П. Константинов, А.И. Лейпунский, Н.Н. Семёнов [2]. Ю.Б. Харитон так отзывался о своём учителе в науке: “У Абрама Фёдоровича была вера в могущество физики... Очень много идей рассыпал он вокруг себя... Иоффе глубоко понимал, что ядерная физика — это тот раздел физики, который не может не дать выхода”.

11 февраля 1943 г. было принято постановление ГКО “О начале практических работ по созданию атомной бомбы” [1]. Общее руководство возлагалось на заместителя председателя ГКО В.М. Молотова, который, в свою очередь, назначил главой Атомного проекта И.В. Курчатова. 12 апреля 1943 г. вице-президентом АН СССР академиком А.А. Байковым было подписано распоряжение о создании Лаборатории № 2 АН СССР во главе с И.В. Курчатовым.

20 августа 1945 г. председатель ГКО СССР И.В. Сталин подписал постановление о создании Специального комитета при ГКО — особого органа управления работами по урану, состоящего из высших государственных деятелей и учёных-физиков [3]. Именно с этой даты отечественная отрасль ведёт отсчёт своей истории.

9 апреля 1946 г. постановлением Совета министров СССР создаётся КБ № 11 при Лаборатории № 2 АН СССР по разработке конструкции и изготовлению опытных образцов атомных бомб. Местом его расположения стал г. Арзамас-16 на границе Горьковской области и Мордовской АССР (с 1995 — г. Саров). Начальником КБ-11 назначается П.М. Зернов, главным конструктором — Ю.Б. Харитон [3].

Отметим важнейшие составляющие Атомного проекта СССР:

- решение сложнейших научно-технических задач по разработке РДС-1, включая и технологии получения ключевых ядерных материалов;
- создание новой отрасли — атомной промышленности;
- создание ядерного оружейного центра;
- создание полигона для ядерных испытаний;
- формирование системы кооперации предприятий, организаций, институтов Академии наук, направленной на достижение общей цели;
- развитие фундаментальных и прикладных исследований в новых областях;
- форсированная подготовка специалистов нового поколения в вузах, развитие научных школ.

В числе принципиальных особенностей Атомного проекта — овладение новыми знаниями, разработка новых технологий, организация новых производств. *Новые знания* удалось получить в области ядерной физики, физики взрыва и гидродинамики высоких плотностей энергии, радиохимии, специального материаловедения. *Новые технологии* были разработаны и использованы при постройке ядерного реактора, выделении плутония из облучённого ядерного топлива, газодиффузионном и электромагнитном разделении изотопов. Для решения сложнейших технических задач были организованы *новые производства*: предприятия по добыче и переработке урана, комбинат по производству плутония, комбинаты по производству высокообогащённого урана [4].

Научные школы КБ-11 (с февраля 1992 г. — Российский федеральный ядерный центр “Все-российский научно-исследовательский институт экспериментальной физики”) в начале 1950-х годов возглавили выдающиеся учёные Н.Н. Боголюбов, Я.Б. Зельдович, М.А. Лаврентьев, А.Д. Сахаров, И.Е. Тамм, Г.Н. Флёрер, Д.А. Франк-Каменецкий, Ю.Б. Харитон.

Важным слагаемым успеха проекта стали разведывательные данные. Поражают масштаб и эффективность работы наших разведчиков. По атомной проблеме ими было передано в центр более 10 000 страниц текста, техническая документация, чертежи и даже образцы материалов (уран, бериллий). Информация поступала из Великобритании, Канады, США [4].

Послевоенная военно-политическая ситуация в мире характеризовалась крайней напряжённостью, особенно в условиях монополии США на ядерное оружие. В 1949 г. в США действовало 4 промышленных ядерных реактора по наработке оружейного плутония, причём два из них были пущены ещё в конце 1944 г., один — в начале 1945-го. К концу 1945 г. на этих реакторах удалось наработать около 120 кг оружейного плутония, а четыре года спустя — уже около 700 кг. СССР к концу 1949 г. вряд ли располагал количеством плутония, заметно превышающим 10 кг.

В 1949 г. ядерный арсенал США составлял 170 зарядов общим энерговыделением в 4.2 мегатонны и средним энерговыделением каждого из них около 25 килотонн. По физической схеме это были плутониевые заряды с использованием имплозии. Стратегическая авиация рассматривалась в качестве средства доставки ядерного оружия на территорию СССР, а для расширения её боевых возможностей вдоль границ нашей страны интенсивно развёртывались военные базы. Перечисленные факты с очевидностью указывают на жизненную необходимость работ по ликвидации атомной монополии США, и эта монополия была ликвидирована 29 августа 1949 г.

Решением Специального комитета от 28 сентября 1945 г. [5] учёные Академии наук привлекаются к работам на ключевых позициях Атомного проекта [6]. В постановлении, принятом Совнаркомом, помимо институтов АН СССР перечислены 10 институтов из состава различных наркоматов. Для подготовки предложений по координации исследовательских работ вновь привлекаемых организаций Технический совет рекомендовал создать при нём три постоянные комиссии. Комиссию по вопросам ионного метода возглавил академик А.Ф. Иоффе, в её состав вошли А.А. Лебедев (Государственный оптический институт), С.А. Векшинский (Центральная вакуумная лаборатория Наркомата электропромышленности СССР) и Л.А. Арцимович (Лаборатория № 2 АН СССР). Председателем комиссии по вопросам получения тяжёлой воды назначили академика П.Л. Капицу, при этом включив в её состав М.О. Корнфельда (Лаборатория № 2 АН СССР) и сотрудников подразделений Наркомата химической промышленности В.Н. Каргина (Институт им. Л.Я. Карпова), А.Г. Касаткина, инженера Л.С. Генина (Государственный специализированный проектный институт-3), Г.И. Гаврилова (Государственный НИИ-42). Комиссию по изучению плутония возглавил академик В.Г. Хлопин (Радиевый институт АН СССР), его заместителем назначили члена-корреспондента АН СССР Б.А. Никитина. В состав комиссии вошли Б.В. Курчатов (Лаборатория № 2 АН СССР), академик А.Н. Фрумкин (Институт физической химии АН СССР), академик И.И. Черняев (Институт неорганической химии АН СССР).

К работам по реализации проекта были привлечены коллективы профильных академических институтов, в том числе ведущие сотрудники Физико-технического института АН СССР (директор академик А.Ф. Иоффе) — Д.Г. Алхазов, Е.Ф. Гросс, С.Е. Бреслер, А.П. Александров, Физического института АН СССР (директор академик С.И. Вавилов) — И.М. Франк, Е.Л. Фейнберг, Л.В. Грошев, Д.В. Скобельцын, В.И. Векслер, Радиевого института АН СССР (директор академик В.Г. Хлопин) — Б.А. Никитин, А.П. Ратнер, А.А. Гринберг, К.Д. Петржак, М.Г. Мещеряков, А.П. Жданов, сотрудники Института неорганической химии АН СССР (директор академик И.И. Черняев), Института химической физики АН СССР (директор академик Н.Н. Семёнов), Уральского филиала АН СССР (председатель филиала академик И.П. Бардин), Лаборатории геохимических проблем АН СССР (директор член-корреспондент АН СССР А.П. Виноградов), Физического института АН УССР (директор академик А.И. Лейпунский), Лаборатории № 1 АН СССР на базе Харьковского физико-технического института (директор

К.Д. Синельников) и многих других научных организаций страны.

Ключевым вопросом в создании атомной бомбы стало получение уранового сырья. На необходимость развития уранодобывающей промышленности в СССР указывала ещё в довоенное время Урановая комиссия, в состав которой входили выдающиеся геохимики В.И. Вернадский и А.Е. Ферсман. 30 июля 1943 г. было выпущено распоряжение ГКО об организации геологоразведочных работ и добычи урана, проведение их поручалось Комитету по делам геологии при СНК СССР [1]. В начале 1946 г. И.В. Курчатов писал: “До мая 1945 года не было надежд осуществить уран-графитовый котёл, так как в нашем распоряжении было только 7 тонн окиси урана и не было надежды, что нужные 100 тонн урана будут выработаны ранее 1948 года...”

К началу 1949 г. ресурс добытого природного урана, которым располагал СССР, составлял 25% ресурса США. При этом около 73% природного урана СССР было получено из-за рубежа, в основном из Германии и Чехословакии. Однако мощности уранодобывающей промышленности постепенно подтягивались к мощностям США: к концу 1949 г. поступление природного урана в СССР достигло уже 86% от уровня США [4]. В итоге десятилетней напряжённой работы коллективов геологов, геофизиков и других специалистов в СССР и странах Восточной Европы было открыто, разведано и передано в эксплуатацию более 50 месторождений урана с общими запасами 84 000 т. Они обеспечили устойчивую сырьевую базу Атомного проекта.

Получение плутония — главный технологический этап создания первой атомной бомбы. Опытной площадкой для отработки процессов и технологий его получения стал первый в Европе атомный реактор Ф-1, запущенный в 1946 г. в Лаборатории № 2 АН СССР [6]. Получив положительные результаты, приступили к постройке промышленного реактора на Урале. Перечислим этапы его создания.

1 декабря 1945 г. принимается Постановление СНК СССР о строительстве Комбината № 817 (в настоящее время — ПО “Маяк”), научный руководитель создания реактора “А” И.В. Курчатов, главный конструктор Н.А. Доллежал. 19 июня 1948 г. под руководством И.В. Курчатова производится запуск реактора “А” с нулевой отметки (рис. 2). 22 декабря 1948 г. состоялся пуск завода “Б” для радиохимического выделения плутония, содержащегося в отработанном ядерном топливе реактора “А”. Радиохимические процессы для завода “Б” были разработаны под руководством академика В.Г. Хлопина в Радиевом институте. В августе 1949 г. на заводе “В” были изготовлены полусферы из металлического плутония для

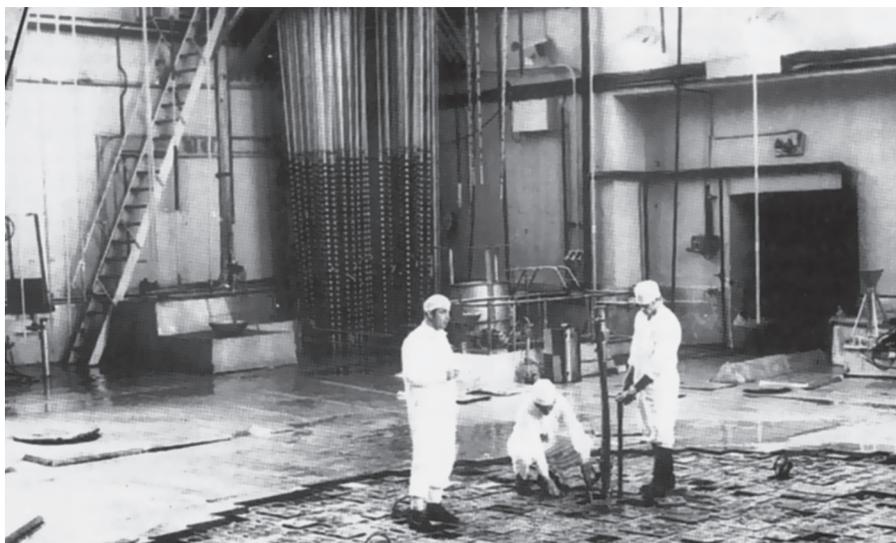


Рис. 2. Центральный зал управления реактором “А”

РДС-1. Технология получения чистого металлического плутония была разработана в НИИ-9 под руководством академика А.А. Бочвара, научного руководителя завода “В” [6].

Создание РДС-1 продемонстрировало замечательные возможности советской науки, техники и промышленности, этот успех стал точкой отсчёта промышленного производства атомного оружия [7]. Постановлением Совета министров СССР от 3 марта 1949 г. сборочному заводу на базе КБ-11 предписывалось выпускать 20 бомб типа РДС-1 в год.

Приведём основные итоги создания РДС-1. Помимо решения основной задачи – обеспечения обороноспособности, они способствовали модернизации страны и, в частности:

- развитию вычислительной математики;
- формированию базы развития атомной энергетики и ядерных силовых установок;
- созданию основ физики высоких плотностей энергии, включая средства диагностики взрывных процессов;
- развитию ускорительной техники и физики атомного ядра, радиохимии и физико-химии получения высокочистых и специальных материалов;
- возникновению радиационной биологии.

К 1953 г. международная обстановка продолжала оставаться очень напряжённой. США по данным на этот год имели в 10 раз больше атомных зарядов, чем СССР, располагали авиапарком из более 1800 бомбардировщиков для их доставки. Кроме того, США достигли крупных успехов в создании термоядерного оружия большой мощ-

ности. Задача создания такого оружия была поставлена и перед советскими учёными.

Если на первом этапе осуществления Атомного проекта высокую эффективность показала Ленинградская школа физиков, то на втором (термоядерном) этапе – Московская школа физиков с молодым лидером А.Д. Сахаровым (рис. 3). В 1953 г. прошли успешные испытания сахаровской “слойки” [8], в 1955 г. был реализован принцип радиационной имплозии [9].

Советский Союз справился с решением сложнейших научных задач, и в этой связи нельзя не назвать участников разработки первых образцов термоядерного оружия, впоследствии ставших лауреатами Нобелевской премии: Н.Н. Семёнов (1956), И.Е. Тамм (1958), Л.Д. Ландау (1962), П.Л. Капица (1978), И.М. Франк (1958), Л.В. Канторович (1975), В.Л. Гинзбург (2003). Руководство нашей страны по достоинству оценило труд учёных. Звания Героя Социалистического Труда трижды удостоились А.П. Александров, Б.Л. Ванников, Н.Л. Духов, Я.Б. Зельдович, И.В. Курчатов, А.Д. Сахаров, Е.П. Славский, Ю.Б. Харитон (рис. 4), К.И. Шёлкин.

С началом соперничества двух великих держав в создании всех видов ядерных вооружений перед СССР встала очень трудная в экономическом и научно-техническом плане задача достижения паритета с США. К чести нашей страны она на протяжении десятилетий своевременно и адекватно отвечала на вызовы, инициатором которых (по существу гонки вооружений) были США. Первые образцы термоядерного оружия были созданы в СССР и США практически одновременно, но имели принципиально отличные конфигурации термоядерных узлов. От идеи атомного об-



Рис. 3. Академики И.В. Курчатов и А.Д. Сахаров. 1958 г.

жания до испытания как в США, так и в СССР прошёл примерно год и 8 месяцев (с 9 марта 1951 до 1 ноября 1952 г. в США, с 1 марта 1954 до 22 ноября 1955 г. в СССР).

Создание в СССР термоядерного оружия – переломный момент истории середины XX века. Физики, участвовавшие в термоядерном проекте,



Рис. 4. Академик Ю.Б. Харитон – научный руководитель Всесоюзного (ныне Всероссийского) научно-исследовательского института экспериментальной физики с 1946 по 1992 г.

первыми поняли, что создали оружие сдерживания и донесли эту точку зрения до руководителей страны, и затем уже политики в 1954–1956 гг. выдвинули тезис о необходимости мирного сосуществования. С развёртыванием в полном объёме оружия сдерживания была отодвинута угроза третьей мировой войны. Крупный военный конфликт с нашей страной стал невозможным. В этой связи особо следует подчеркнуть, что в поддержание мира на протяжении последних 75 лет большой вклад внесли Росатом и Академия наук.

Паритет удавалось поддерживать и в отношении морской компоненты стратегических сил, и в отношении разделяющихся боеголовок, а также нейтронных зарядов для тактических вооружений. В этой сложной и напряжённой работе наряду с ВНИИЭФ участвовали ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина, ВНИИА им. Н.Л. Духова и весь коллектив Росатома (ранее, с 1953 по 1989 г., Министерство среднего машиностроения СССР) с его десятью закрытыми административно-территориальными образованиями.

Какие же уроки мы можем извлечь сегодня из Атомного проекта? Первый из них заключается в умении целенаправленно и рационально организовать и координировать все работы по атомной проблеме. Второй состоит в способности привлекать всю интеллектуальную мощь страны для выполнения государственной задачи. Урок третий: Атомный проект – пример того, как необходимо реагировать на прорыв в научной сфере, имеющий колоссальное оборонное значение. И ещё

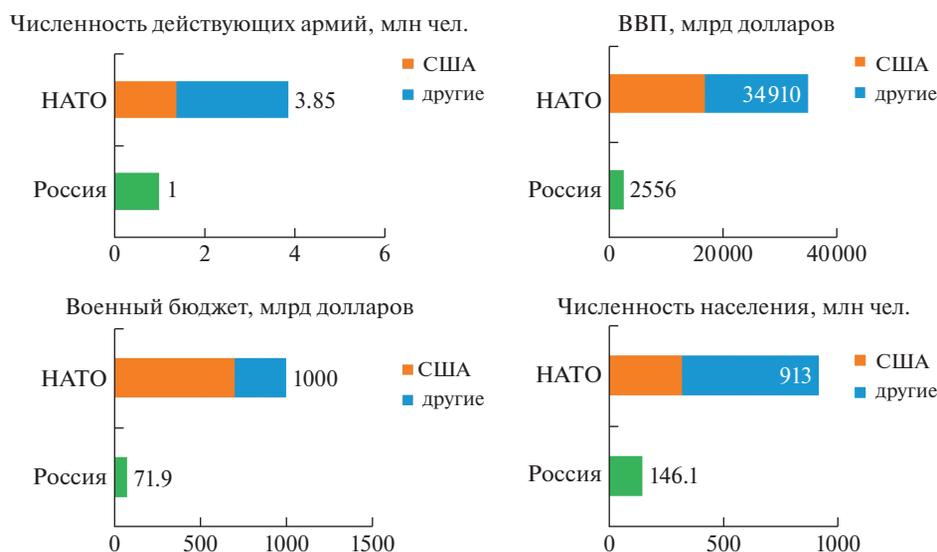


Рис. 5. Сравнительные военно-экономические показатели РФ и НАТО

один урок: Атомный проект – пример создания оружия сдерживания, основанного на самых передовых технологиях, определяемых достижениями фундаментальной науки, пример, которому должна следовать наша оборонная доктрина в XXI столетии.

Оборонные работы по обеспечению ядерного сдерживания остаются приоритетными и в наши дни. Эта область, как и в годы реализации Атомного проекта, – широкое поле для совместной деятельности Росатома и РАН. В условиях действия Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, который наша страна подписала и ратифицировала, изучение и понимание физических процессов, происходящих в ядерных зарядах, не только не сходит с повестки дня, а наоборот, становится более актуальным. Нам необходимо модернизировать все физические модели, используемые в расчётно-теоретических работах по обоснованию надёжности, безопасности и эффективности ядерного оружия. Центр тяжести этих работ переносится в научные лаборатории и математические центры с мощной вычислительной базой. Создание и поддержание на мировом уровне принципиально новой экспериментальной и вычислительной базы – для нас первоочередная задача. Её решение позволит гарантировать безопасность и надёжность нашего ядерного арсенала до конца XXI в. По важности и многомерности она сравнима с теми, которые решались в годы реализации Атомного проекта СССР. На наш взгляд, необходимо сформировать совместную программу работ Росатома и РАН в интересах обеспечения безопасности государства и развития науки – с государственным финанси-

рованием и чёткой ответственностью сторон за обеспечение результатов работ.

Не менее важно для обеспечения конкурентоспособности ядерного оружейного комплекса в XXI в. решение и других проблем. В их числе поддержание надёжности, безопасности и эффективности широкой номенклатуры ядерных зарядов и ядерных боеприпасов для решения задач регионального ядерного сдерживания, преодоления развёрнутой ПРО, повышения эффективности вооружённых сил на гипотетических театрах военных действий в условиях асимметрии неядерных средств и вооружений. Не менее актуальная задача – обеспечение эффективности ядерных зарядов и ядерных боеприпасов в условиях ответного и ответно-встречного удара для нанесения неприемлемого ущерба агрессору. Важно также обеспечить кадровую преемственность уникальных знаний, технологий и методов в условиях относительного ослабления отечественной науки и образования, утечки лучших выпускников профильных вузов за рубеж.

Имея в виду турбулентность мировых процессов, обострившуюся борьбу за ограниченные природные ресурсы, малую численность населения России при её огромной территории, ядерное оружие – гарант национальной безопасности страны (рис. 5). Ему как эффективному средству сдерживания возможной военной агрессии в краткосрочной и среднесрочной перспективе нет альтернатив. В ядерном оружии России сконцентрированы талант и знания нескольких поколений выдающихся учёных и инженеров, поэтому естественно, что это драгоценное наследие должно в полной мере послужить нашей стране в нелёгкое для неё время.

XX век был бурным, противоречивым, даже трагическим, и всё-таки великим. Он завершился, но не заканчивается жизнь, научный поиск, люди не теряют надежды на лучшее будущее. На протяжении многих лет нам довелось тесно общаться с академиком Ю.Б. Харитоновым, обсуждать с ним не только рабочие проблемы. На однажды заданный ему вопрос “Как же в жизни обрести желаемое?” Юлий Борисович спокойно и просто ответил одним словом – “трудясь”.

Отмечая 75-летие атомной отрасли, необходимо подчеркнуть, что она начала создаваться сразу после Великой Победы, одержанной нашей страной в войне, по существу, со всей Европой, после Победы, равной которой нет в мировой истории. И сразу же последовал новый вызов, связанный с созданием в США атомной бомбы, в разработке которой приняли участие лучшие учёные мира. Советским Союзом вызов был принят и на него был дан убедительный ответ.

Впервые в своей истории наша страна стала сверхдержавой. В достижение этих высот существенный вклад внесли коллективы атомной отрасли, Академии наук, их институтов и производств.

Впервые в истории – на протяжении 75 лет – нашей стране удаётся избегать крупных военных конфликтов. И в этом тоже большая заслуга “Росатома” и его предшественников, а также Академии наук.

Опыт создания и развития атомной отрасли доказывает, что для нашей страны посильно решение самых сложных и масштабных задач. Для

этого необходимы только разумное целеполагание, политическая воля и единство всего общества. Все остальное у нас есть: и опыт, и традиции, и кадры, и ресурсы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атомный проект СССР: Документы и материалы / Под общ. ред. Л.Д. Рябева. В 3-х т. Т. I. Атомная бомба. 1938–1945. Ч. 1 / Отв. сост. Л.И. Кудинова. М.: Наука, Физматлит, 1998.
2. Храмов Ю.А. Физика. Биографический справочник. М.: Наука, 1983.
3. Атомный проект СССР: Документы и материалы / Под общ. ред. Л.Д. Рябева. В 3 т. Т. II. Атомная бомба. 1945–1954. Кн. 1 / Отв. сост. Г.А. Гончаров. М.: Наука, Физматлит, 1999.
4. Андриюшин И.А., Чернышёв А.К. 65 лет мира. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2014.
5. Атомный проект СССР: Документы и материалы / Под общ. ред. Л.Д. Рябева. В 3-х т. Т. II. Атомная бомба. 1945–1954. Кн. 2 / Сост. Г.А. Гончаров, П.П. Максименко. М.: Наука; Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2000.
6. Андриюшин И.А., Ильяев Р.И., Чернышёв А.К. Игорь Васильевич Курчатов. Основатель атомной отрасли. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2015.
7. Андриюшин И.А., Чернышёв А.К., Юдин Ю.А. Укрощение ядра. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2003.
8. Андриюшин И.А., Ильяев Р.И., Чернышёв А.К. “Слойка” Сахарова. Путь гения. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2011.
9. Андриюшин И.А., Ильяев Р.И., Чернышёв А.К. Решающий шаг к миру. Водородная бомба с атомным обжатием РДС-37. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2010.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

ВЗРЫВЫ, МОЩНЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ
И ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

© 2021 г. **В. Е. Фортгов^a**, **Р. И. Ильяев^{b,*}**, **Г. Н. Рыкованов^{c,**}**,
В. Д. Селемир^{b,*}**, **Б. Ю. Шарков^{d,****}**

^a Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^b Российский федеральный ядерный центр

“Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики”, Саров, Россия

^c Российский федеральный ядерный центр “Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина”, Снежинск, Россия

^d Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: ilkaev@vniief.ru

**E-mail: g.n.rykovanov@vniitf.ru

***E-mail: VDSelemir@vniief.ru

****E-mail: sharkov@jinr.ru

Поступила в редакцию 13.01.2021 г.

После доработки 22.01.2021 г.

Принята к публикации 30.01.2021 г.

Экстремальные состояния возникают при воздействии на вещество мощных ударных, детонационных и электровзрывных волн, концентрированного лазерного излучения, электронных и ионных пучков, при мощных химических и ядерных взрывах, гиперзвуковом движении тел в плотных атмосферах планет, высокоскоростном ударе и во многих иных ситуациях, характеризующихся предельно высокими давлениями и температурами. Изучение вещества в экстремальных условиях — одна из наиболее актуальных и интенсивно развивающихся фундаментальных научных дисциплин, находящаяся на стыке физики плазмы, нелинейной оптики, конденсированного состояния, ядерной, атомной и молекулярной физики, релятивистской и магнитной гидродинамики. В нашей стране исследования в области физики высокой плотности энергии и экстремальных состояний вещества динамично развиваются благодаря активному сотрудничеству Российской академии наук и Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”.

Ключевые слова: экстремальные состояния вещества, высокая плотность энергии, ударные волны, неидеальная плазма, мощные магнитные поля.

DOI: 10.31857/S0869587321050091

Первые десятилетия XX в. ознаменовались многими яркими научными достижениями в исследовании строения атома и атомного ядра. Опираясь на результаты работ в этой области ряда

ФОРТОВ Владимир Евгеньевич — академик РАН, научный руководитель ОИВТ РАН с 2018 по 2020 г. ИЛЬКАЕВ Радий Иванович — академик РАН, почётный научный руководитель РФЯЦ–ВНИИЭФ. РЫКОВАНОВ Георгий Николаевич — академик РАН, научный руководитель РФЯЦ–ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина. СЕЛЕМИР Виктор Дмитриевич — член-корреспондент РАН, директор Научно-производственного центра физики РФЯЦ–ВНИИЭФ. ШАРКОВ Борис Юрьевич — академик РАН, вице-директор ОИЯИ.

ведущих физиков мира, И.В. Курчатов, Я.Б. Зельдович, Ю.Б. Харитон и другие уже в 1939 г. обосновали возможность протекания в уране цепной реакции деления ядер, а следовательно, возможность практического использования принципиально нового — ядерного — источника энергии, в миллионы раз более мощного, чем традиционные химические реакции. Вскоре после этого были сформулированы условия реализации цепной ядерной реакции взрывного типа (открытой ранее академиком Н.Н. Семёновым для химических реакций) с выделением беспрецедентно большого количества энергии [1, 2]. Это означа-

ло, что учёные подошли к порогу создания оружия необычайно разрушительной силы [2, 3].

В середине XX в. развитие физики высоких плотностей энергии получило мощный импульс в связи с вхождением нашей цивилизации в атомную и космическую эру. Первым шагом в этом направлении стало создание ядерного и термоядерного оружия [2–7]. В ядерных зарядах высокие плотности энергии, порождаемые мощными ударными волнами, используются для инициирования цепных ядерных реакций в сжатом ядерном топливе. В термоядерных зарядах высокоэнергетические состояния — основной инструмент для сжатия, разогрева термоядерного топлива и инициации в нём термоядерных реакций синтеза. То есть работа ядерных устройств с квазиконтролируемым (атомные и водородные заряды) и с контролируемым (инерционный управляемый термоядерный синтез) энерговыделением основана на инициировании ядерных реакций синтеза в смеси дейтерия и трития в сильно сжатом и разогретом ядерном топливе.

Большой вклад в развитие науки об экстремальном состоянии вещества на этом этапе внесли выдающиеся учёные академики Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров, Ю.Б. Харитон, Е.И. Заббахин, А.И. Павловский, член-корреспондент АН СССР С.Б. Корнер, доктор физико-математических наук Л.В. Альтшулер и другие. Начатые ими в середине 1950-х годов исследования в рамках ядерных оборонных проектов СССР в дальнейшем получили значительное развитие с появлением новых устройств генерации высоких плотностей энергии, таких как лазеры, пучки заряженных частиц, сильноточные Z-пинчи, взрывные, электровзрывные генераторы мощных ударных волн, многоступенчатые легкогазовые пушки и алмазные наковальни. Эти сложные и дорогие технические устройства позволили существенно продвинуться по шкале доступных для физического эксперимента концентраций энергии и получить в лабораторных или квазилабораторных условиях состояния мега- и гигабарного диапазонов давлений, недостижимых для традиционной техники физического эксперимента. Кроме того, устойчивым прагматическим стимулом таких исследований явилось практическое применение состояний с высокими концентрациями энергии в ядерной, термоядерной и импульсной энергетике, электрофизике высоких напряжений и мощностей для синтеза сверхтвёрдых веществ, упрочнения и сварки материалов, противометеоритной защиты космических аппаратов и, конечно, для нужд обороны.

Физика высоких плотностей энергии превратилась сегодня в обширный и быстро развивающийся раздел современной науки, где приме-

няются самые передовые средства генерации, методы диагностики и компьютерного моделирования на наиболее мощных суперкомпьютерах. “Высокими” традиционно принято считать концентрации энергии в веществе, превышающие 10^4 – 10^5 Дж/см³, что соответствует энергии связи валентных электронов в несколько эВ и давлениям примерно от 100 кбар до 1 Мбар [3, 8, 9]. Эти давления значительно превосходят пределы механической прочности веществ, что вызывает необходимость учёта их сжимаемости при гидродинамическом движении в результате импульсного энерговыделения.

Состояние вещества, характеризующееся предельно высокими температурами и давлениями, а следовательно, экстремально высокими концентрациями энергии, всегда привлекало исследователей перспективами получения в лабораториях таких экзотических условий, при которых возникла наша Вселенная в результате Большого взрыва. Экзотическое состояние характерно и сегодня для подавляющей (90–95%) массы барионного (видимого) вещества — в звёздных и межзвёздных объектах, в планетах и экзопланетах [10].

Как правило, вещество в условиях высоких плотностей энергии находится в плазменном (ионизированном) состоянии, так как в нём идут процессы термической ионизации и/или ионизации давлением. В астрофизических объектах такое сжатие и разогрев осуществляются гравитационными силами и ядерными реакциями, а в лабораторных условиях — мощными ударными волнами, для возбуждения которых применяется широкий набор “драйверов” — от двухступенчатых газовых пушек до лазеров и сильноточных Z-пинчей мощностью сотни тераватт [3, 10]. При этом, если в астрофизических объектах время существования экстремальных состояний варьируется от миллисекунд до миллиардов лет, позволяя проводить их подробное наблюдение и измерение при помощи космических зондов, орбитальных и наземных телескопов различных длин волн, то в земных условиях речь идёт о микро-, фемто-, аттосекундном диапазоне длительностей [3, 11], что требует применения специфических предельно быстродействующих средств диагностики.

Важно отметить, что в экспериментах с лабораторной плазмой экстремальных состояний уже сейчас удаётся в малом масштабе частично воспроизвести многие явления и процессы, происходящие в астрофизических объектах, информация о которых стала доступна в результате применения земных и космических наблюдательных средств. Это сведения о гидродинамическом пе-

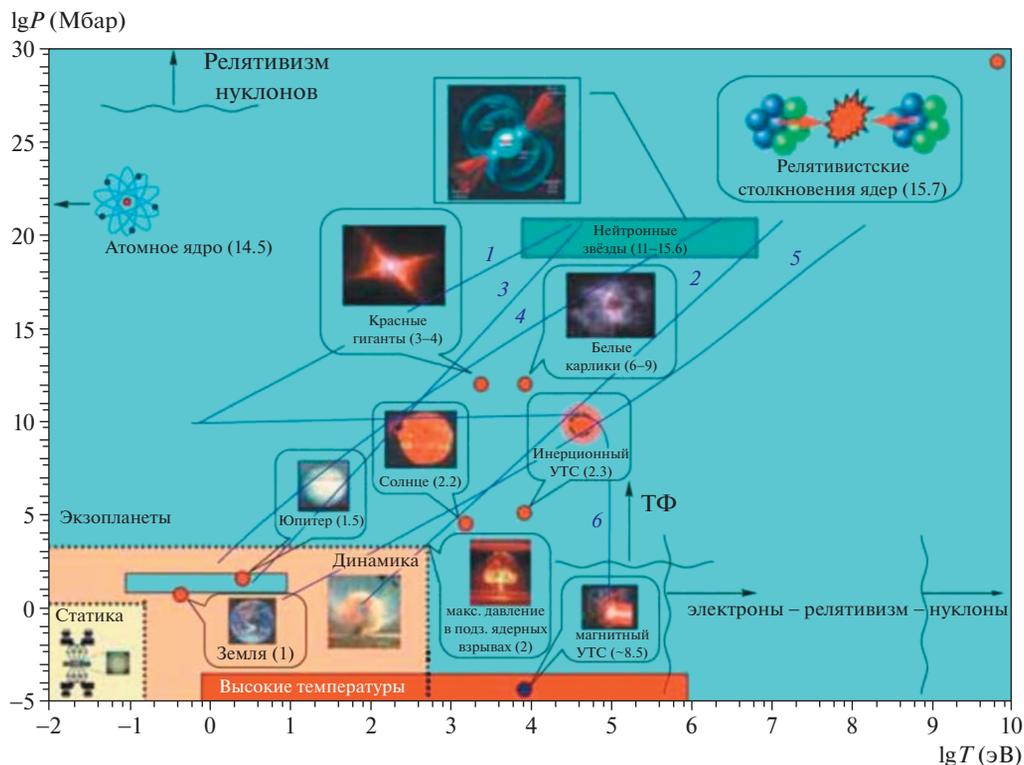


Рис. 1. Экстремальные состояния [3] в природе и в лаборатории

Цифры в скобках указывают логарифм плотности (в г/см^3). Область “статика” соответствует статическому; “динамика” – динамическому методу получения высоких давлений; “высокие температуры” – экспериментам при высоких температурах. Линиями 1–6 обозначены состояния электронной компоненты вещества для углерода: 1 – граница области вырождения ядер; 2 – граница области идеальности; 3 – кривая плавления; 4 – граница области, в которой решётка может считаться классической; 5 – граница области вырождения электронов; 6 – граница области релятивизма электронов

Источник: [4].

ремешивании и разнообразных неустойчивостях, ударно-волновых явлениях, сильноизлучающих, релятивистских и замагниченных потоках и струях, солитонах, релятивистских явлениях, уравнениях состояния, составе и спектрах сжатой неидеальной плазмы, а также характеристики межзвёздной космической плазмы, пыли.

Фазовая диаграмма материи в экстремальном состоянии. На рисунке 1 представлена диаграмма, демонстрирующая экстремальные условия, которые реализуются в ряде физических объектов природы и в технике [10, 12]. Возникновение экстремальных состояний в природе вызвано силами тяготения, носящими дальнедействующий и, в отличие от кулоновских (в электромагнитной плазме), неэкранируемый характер. Эти силы сжимают и разогревают вещество либо непосредственно, либо стимулируя экзотермические ядерные реакции в массивных астрофизических объектах, что проявлялось и на ранних этапах эволюции Вселенной [9, 12].

Плазма как наиболее распространённое состояние вещества в природе (95% массы Вселенной без учёта “тёмной” материи) занимает практически всю область фазовой диаграммы (см. рис. 1). При этом особую трудность при физическом описании такой среды представляет область неидеальной плазмы, где энергия межчастичного кулоновского взаимодействия $e^2 n^{1/3}$ сравнима или превосходит кинетическую энергию движения частиц E_k . В этой области, где параметр неидеальности $\Gamma = e^2 n^{1/3} / E_k > 1$, эффекты плазменной неидеальности не могут быть описаны теорией возмущений [8, 12], а применение машинных беспараметрических методов Монте-Карло или молекулярной динамики [13] связано с трудностями выбора адекватных псевдопотенциалов и правильного учёта квантовых эффектов.

Квантовые эффекты определяются параметром вырождения $n\lambda^3$ ($\lambda = \sqrt{\hbar^2 / 2mkT}$ – тепловая дебройлевская длина волны). Для вырожденной плазмы, $n\lambda^3 \gg 1$, масштабом кинетической энер-

гии является энергия Ферми $E_F \approx \hbar^2 n^{2/3}/2m$, которая растёт с ростом плотности плазмы, делая её по мере сжатия, $n \rightarrow \infty$, всё более идеальной: $\Gamma = me^2/(\hbar^2 n^{1/3}) \rightarrow 0$. Условие релятивизма, соответствующее условию $m_e c^2 \approx E_F \approx 0.5$ МэВ, даёт плотность $\rho \approx 10^6$ г/см³.

Эффекты релятивизма электронов в уравнении состояния и транспортных свойств плазмы, когда $m_e c^2 \approx kT$, соответствуют $T \approx 0.5$ МэВ $\approx 6 \times 10^6$ К. Выше этой температуры вещество становится неустойчивым по отношению к спонтанному рождению электрон-позитронных пар.

Масштабы реализуемых в природе экстремальных состояний способны поразить самое смелое воображение (см. рис. 1). На дне Марианской впадины (11 км) давление воды достигает 1.2 кбар, в центре Земли — 3.4 Мбар, $T \approx 0.5$ эВ, плотность $\rho \approx 10\text{--}20$ г/см³; в центре Юпитера $P \approx 40\text{--}70$ Мбар, $\rho \approx 30$ г/см³, $T \approx 2 \times 10^4$ К; в центре Солнца $P \approx 240$ Гбар, $T \approx 1.6 \times 10^3$ эВ, $\rho \approx 150$ г/см³; в остывающих звёздах — белых карликах $P \approx 10^{10}\text{--}10^{16}$ Мбар, $\rho \approx 10^6\text{--}10^9$ г/см³, $T \approx 10^3$ эВ. В мишенях управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы $P \sim 200$ Гбар, $\rho \approx 150\text{--}200$ г/см³, $T \sim 10^8$ эВ. Нейтронные звёзды, являющиеся элементами пульсаров, магнитаров, источниками γ -всплесков, имеют, по-видимому, рекордно высокие параметры: $P \approx 10^{19}$ Мбар, $\rho \approx 10^{11}$ г/см³, $T \approx 10^4$ эВ для мантии и $P \approx 10^{23}$ Мбар, $\rho \approx 10^{14}$ г/см³, $T \approx 10^4$ эВ для ядра при гигантской величине индукции магнитного поля $10^{11}\text{--}10^{16}$ Гс.

При столкновениях тяжёлых ядер, разогнанных в современных ускорителях до релятивистских скоростей, возникают состояния сверхсжатой кварк-глюонной плазмы с ультраэкстремальными параметрами $P \approx 10^{30}$ бар, $\rho \approx 10^{15}\text{--}10^{16}$ г/см³, $T \approx 10^{14}$ К, превосходящими условия, реализуемые в экстремальных астрофизических объектах [10].

Методы генерации высоких плотностей энергии в веществе. Современные экспериментальные возможности хотя и быстро увеличиваются, но позволяют лишь частично вторгнуться в область ультраэкстремальных астрофизических состояний. Прочность вещества принципиально ограничивает применение статических методов исследования высоких плотностей энергии, так как подавляющее большинство конструкционных материалов не способно выдержать интересующие экспериментаторов высокие давления. Исключение составляет алмаз — рекордсмен по твёрдости ($\sigma_n \approx 500$ кбар), что позволяет, используя его в алмазных наковальнях, достигать в статических опытах давлений 3–5 Мбар [10]. Пальма

первенства принадлежит сейчас динамическим методам [3, 8, 14, 15], основанным на импульсной кумуляции высоких плотностей энергии в веществе. Время жизни таких высокоэнергетических состояний определяется временем инерционного разлёта плазмы, имеющего характерный масштаб $10^{-10}\text{--}10^{-6}$ с, что требует применения средств диагностики с высоким временным разрешением.

Использование ударных волн, генерируемых источниками высоких локальных плотностей энергии, позволяет резко расширить диапазон доступных для эксперимента давлений и температур, проникнуть в область, промежуточную между параметрами химических взрывчатых веществ и уникальными параметрами подземных ядерных взрывов. Уже в первых экспериментах с лазерными, пучковыми и электродинамическими ударными волнами удалось получить важные экспериментальные данные об уравнении состояния водорода, дейтерия, меди, железа, углерода и воды и использовать их для анализа строения планет-гигантов Солнечной системы и экзопланет [3, 8, 11].

Спектр экспериментальных устройств для генерации высоких плотностей энергии весьма широк. Он включает в себя алмазные наковальни для статического сжатия вещества, пороховые и легкогазовые метательные устройства — “пушки”, взрывные генераторы мощных ударных волн, электровзрывные устройства, магнитокумулятивные генераторы, лазеры, сильноточные генераторы мощных импульсов электрического тока, ускорители заряженных частиц и возможные комбинации этих устройств. В таблице 1 приведены параметры наиболее мощных из действующих и строящихся типов установок: лазеры, импульсные электротехнические устройства, Z-пинчи, ускорители заряженных частиц [10, 11]. Созданные для проведения плазменных исследований в интересах обороны и физики высоких энергий ускорители релятивистских заряженных частиц (электронов и ионов) сегодня с успехом применяются и для работ по фундаментальной физике плазмы высоких плотностей энергии.

Ударно-волновые динамические методы. Продвижение по шкале высоких плотностей энергии связано с переходом к динамическим методам исследований [8, 9, 15, 16], базирующимся на импульсной кумуляции энергии в изучаемом веществе при помощи мощных ударных волн либо при помощи электромагнитного или корпускулярного излучения различной природы. Возникающие при этом температуры и давления плазмы значительно превосходят термочностные пределы конструкционных материалов установок, что приводит к ограничениям характерного времени

Таблица 1. Источники энергии и экспериментальные устройства, применяемые в физике высоких концентраций энергии

Первичный источник энергии	Конечная форма источника энергии	Плотность энергии, МДж/см ³	Температура, эВ	Давление, 10 ⁵ Па	Полная энергия, МДж	Длительность, с	Мощность, Вт
Химические ВВ	Химические ВВ	10 ⁻²	0.5	5 × 10 ⁵	10 ²	10 ⁻⁷	10 ¹⁰
	Металлические пластины	0.3	60	10 ⁷	3	10 ⁻⁶	10 ¹⁰
	Магнитное поле 1 МЭ	4 × 10 ⁻³	0.3	5 × 10 ⁴	5	10 ⁻⁶	5 × 10 ¹²
	Магнитное поле 25 МЭ	2.5	200	2.5 × 10 ⁷	1	10 ⁻⁷	10 ¹³
	Взрывные генераторы плазмы	10 ⁻²	60	10 ⁵	30	10 ⁻⁶	10 ¹²
Ядерные ВВ	Ядерные ВВ	10 ⁴	10 ⁷	10 ¹⁰	10 ¹¹	10 ⁻⁶	10 ²²
	Нейтронный нагрев	10	50	2 × 10 ⁷	10 ³	10 ⁻⁶	10 ¹⁵
	Ударные волны в твёрдом теле	5	50	5 × 10 ⁷	10 ⁴	3 × 10 ⁻⁶	10 ¹⁵
	Ударные волны в газе	0.3	40	2 × 10 ⁵	10 ⁷	10 ⁻⁵	10 ¹⁸
Сжатый газ	Адиабатическое сжатие	2 × 10 ⁻⁵	0.3	150	10 ³	6 × 10 ⁻³	10 ⁵
	Ударные трубы пневматические	10 ⁻⁴	1	250	10 ⁻²	10 ⁻⁴	3 × 10 ⁸
	Ударные трубы на горении	10 ⁻⁶	2	10	2 × 10 ⁻²	3 × 10 ⁻⁴	10 ⁸
	Ударные трубы, электрический разряд	10 ⁻⁷	2	1	10 ⁻²	10 ⁴	10 ⁸
Лазер	—	10 ⁻⁶	—	—	0.5 × 10 ⁻³	—	10 ¹³
	Мишень	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁸	0.5	10 ⁻¹⁰	5 × 10 ¹⁴
Электронный пучок	—	10 ⁻⁶	—	—	1	10 ⁻⁸	10 ¹⁴
	Мишень	5 × 10	5 × 10 ³	10 ⁷	0.1	10 ⁻⁸	10 ¹³

Источник: [10].

жизни плазмы в динамических экспериментах — оно определяется динамикой разлёта мишени и составляет примерно 10⁻¹⁰–10⁻⁵ с. При динамическом подходе отсутствуют принципиальные ограничения на величину создаваемых в мишени максимальных плотностей энергии и давления, они

лимитируются только мощностью энергетического источника — “драйвера”.

Наиболее распространённым инструментом создания высоких плотностей энергии служат мощные ударные волны [3, 14, 15], характеризующиеся вязким скачком уплотнения, в котором

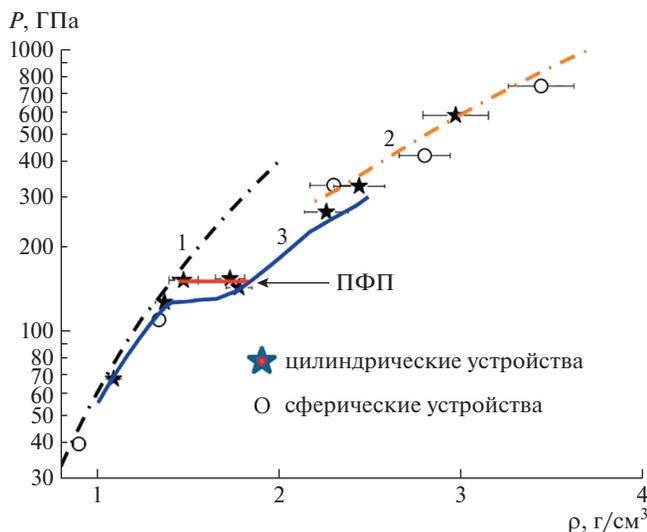


Рис. 2. Квазиизэнтропическое сжатие газообразного дейтерия в области давлений до 10 Мбар

1 – изэнтропа $S = 23.5$ Дж/г, 2 – изэнтропа $S = 26.0$ Дж/г·К, 3 – численное моделирование ОИВТ РАН [10]. Ступенька в давлении привязана к плазменному фазовому переходу (ПФП)

Источник: [19].

кинетическая энергия набегающего потока преобразуется в тепловую энергию сжатой и необратимо разогретой плазмы. Ударные волны возникают в результате нелинейных гидродинамических явлений в веществе при его движении, вызванном импульсным энерговыделением. Такая волна не только сжимает, но и разогревает вещество до высоких температур, что особенно важно для получения плазмы – ионизованного состояния материи. Ряд динамических методик, используемых при экспериментальном изучении сильнонеидеальной плазмы, рассматривается в работах [8, 10, 15].

Ударное сжатие вещества в твёрдом или жидком исходном состоянии даёт возможность получить за фронтом ударной волны состояние неидеальной вырожденной (статистика Ферми) и классической (статистика Больцмана) плазмы, сжатой до максимальных давлений примерно 4 Гбар и разогретой до температур порядка 10^7 К [10, 16], при которых плотность внутренней энергии плазмы сопоставима с ядерной плотностью энергии, а температуры близки к условиям, когда энергия и давление равновесного излучения начинают играть заметную роль в суммарной термодинамике и динамике таких высокоэнергетических состояний.

Для снижения эффектов необратимого нагрева целесообразно использовать сжатие вещества падающими и отражёнными ударными волнами в

определённой последовательности, тогда оно становится близким к более “мягкому” изэнтропическому, что позволяет получить значительно более высокие (в 10–50 раз) степени сжатия и более низкие (примерно в 10 раз) температуры по сравнению с однократным ударно-волновым воздействием. Многократное ударное сжатие было успешно применено для экспериментального изучения ионизации плазмы давлением [10, 17, 18] и диэлектризации вещества [10] при мегабарных давлениях. Квазиadiaбатическое сжатие реализовано также при взрывном высокосимметричном цилиндрическом и сферическом сжатии дейтерия, гелия и инертных газов [10, 18–20]. При этом в дейтерии получены рекордные параметры плазмы. При начальном давлении газообразного дейтерия $p_0 = 267$ атм и $T_0 = 10.5^\circ\text{C}$ зарегистрирована плотность ударно-сжатой дейтериевой плазмы $\rho = (4.3 \pm 0.7)$ г/см³ при давлении $P = 1830$ ГПа. В этих условиях плазма оказывается сильнонеидеальной ($\Gamma \approx 4.5 \times 10^2$), с вырожденной ($n\lambda_e^3 \approx 2.8 \times 10^2$) электронной компонентой и числом электронов $n \approx 2.8 \times 10^{23}$ см⁻³ (рис. 2).

На рисунке 3 приведена схема эксперимента во ВНИИЭФ по измерению сжимаемости газов для моделирования экстремальных астрофизических явлений в лабораторных условиях с использованием уникального рентгенографического комплекса этого института и экспериментальных устройств цилиндрической и сферической геометрии, трансформирующих ударно-волновое сжатие в квазиизэнтропическое. Сжатие образующейся плазмы в таких устройствах осуществляется системой ударных волн, реверберирующих в её объёме, и стальных оболочек, сходящихся к центру под действием продуктов взрыва мощного конденсированного взрывчатого вещества массой до ≈ 85 кг тринитротолуола. Процесс получил название квазиизэнтропического, потому что после прохождения первой ударной волны дальнейшее сжатие плазмы происходит практически без её существенного нагрева при более длительном удержании вещества в сжатом состоянии. Цель эксперимента – регистрация $R(t)$ траектории движения оболочек экспериментального устройства и определение размера внутреннего каскада в момент “остановки”, когда достигается максимальное сжатие исследуемого вещества. Его плотность вычисляется из выражения: $\rho = \rho_0 \cdot (R_0/R_{\min})^n$, где ρ_0 – начальная плотность газа, R_0 и R_{\min} – внутренний радиус оболочки в исходном состоянии и в момент её “остановки” соответственно; $n = 2$ для цилиндрической или 3 для сферической геометрии.

Экспериментальное устройство сферической или цилиндрической геометрии с исследуемым газом размещается перед бетонным сооружением, в котором смонтирован комплекс, разработанный под руководством члена-корреспондента РАН В.Д. Селемира, состоящий из трёх безжелезных импульсных бетатронов БИМ234.3000 с граничной энергией электронов ≈ 60 МэВ. Использование таких бетатронов позволяет просвечивать объекты с массовой толщиной ~ 230 г/см², что эквивалентно толщине ~ 200 мм свинца. Особенность бетатронов ВНИИЭФа — возможность работать в режиме последовательной генерации трёх импульсов рентгеновского излучения с длительностью ~ 150 – 180 нс. Это позволяет в эксперименте зарегистрировать одновременно до 9 фаз сжатия плазмы. В опытах применяется оптико-электронная система детектирования, активируемая синхронно с импульсами бетатрона. В качестве преобразователей рентгеновского излучения в видимое используются монокристаллы йодистого натрия и силикат лютетия. Для устранения влияния рассеянного излучения на высокочувствительные детекторы размер поля регистрации в каждой из проекций ограничивается свинцовыми коллиматорами. Для защиты бетатронов и оптико-электронных регистраторов рентгеновского излучения применены алюминиевые конусы. В динамических экспериментах с устройствами цилиндрической геометрии зарегистрирована аномалия сжимаемости плазмы дейтерия, вызванная фазовым переходом, что сопровождается скачком плотности $\sim 15\%$ в области давлений $P \approx \sim 150$ ГПа при температуре $T \approx 3700$ К [19].

Сегодня использование экспериментальной техники мощных ударных волн для изучения экстремальных состояний вещества — это основной источник информации о поведении сильносжатой сильнонеидеальной плазмы в области рекордно высоких температур и давлений мегабарного и гигабарного диапазонов. Будучи экзотическими для земных условий, ультраэкстремальные состояния вполне характерны для большинства астрофизических объектов, определяя строение, эволюцию и светимость звёзд, планет Солнечной системы, а также более 100 открытых недавно экзопланет [10].

Кроме того, с плазмой ультрамегабарного диапазона связываются перспективные энергетические проекты по управляемому термоядерному синтезу с инерционным удержанием плазмы и реализации высокотемпературных состояний в сжатом водороде. Эти обстоятельства — постоянно действующий стимулирующий фактор экспериментального изучения свойств сильносжатой неидеальной плазмы водорода, дейтерия и инертных газов с использованием мощных ударных

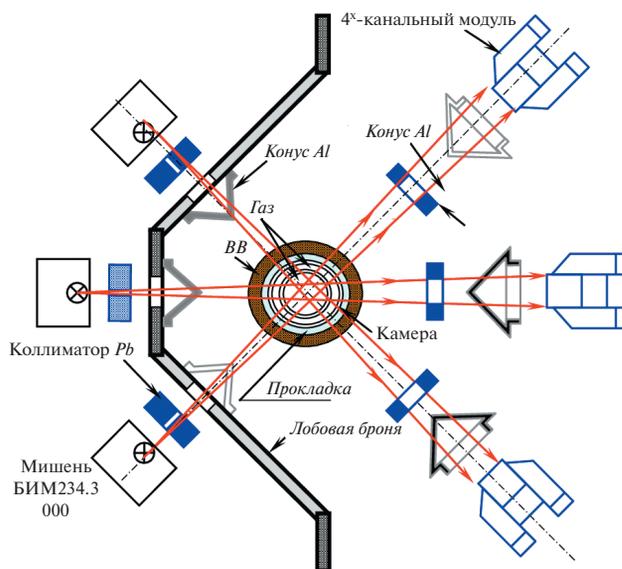


Рис. 3. Схема эксперимента ВНИИЭФ по измерению сжимаемости газов. Ударное сжатие дейтерия и гелия до 185 Мбар, $\rho = 14$ г/см³

волн, для возбуждения которых применяются легкогазовые [17] и взрывные плоские, сферические и полусферические устройства, мощные лазеры и электродинамические ускорители [10, 18, 21].

Уникальное физическое явление — ядерный взрыв. Физики, и в первую очередь разработчики ядерного оружия, в полной мере оценили возможность ядерных взрывов как невиданного дотоле источника генерации сверхмощных ударных и радиационных волн в конденсированных средах и изучения с их помощью ультраэкстремальных состояний вещества [10, 22–24]. Для получения необходимых сведений о физических свойствах и газодинамических особенностях поведения вещества в условиях ядерного взрыва был развёрнут масштабный комплекс экспериментальных и теоретических работ, давших начало новой науке — физике высоких плотностей энергии [8, 16, 22, 23, 25] и динамической физике высоких давлений.

Наряду с измерениями интегральных характеристик ядерного взрыва и его воздействия выполнялись опыты по изучению физических свойств вещества при экстремальных давлениях и температурах. Постановка и основные физические результаты таких экспериментов содержатся в обстоятельном обзоре [24] и представлены на рисунке 4 [10, 26, 27]. Мировой рекорд уровня давления, при котором были измерены параметры уравнения состояния сильносжатой и многократно ионизированной плазмы, состав-

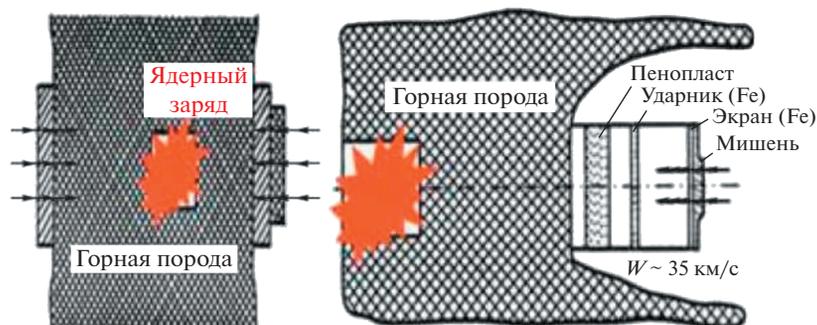


Рис. 4. Схема экспериментов по генерации мощных ударных волн в ближней зоне ядерного взрыва

Источники: [10, 16, 24].

ляет $P \approx 4$ млрд атмосфер — он получен в ближней зоне ядерного взрыва.

Совокупность экспериментальных данных по ударно-сжатой плазме алюминия приведена в работах [10, 16, 24], где наивысшие значения давлений соответствуют рекордным в земных условиях параметрам. Плотность внутренней энергии такой плазмы составляет $E \approx 10^9$ Дж/см³, что близко к плотности энергии ядерной материи, а давление $P \approx 4$ Гбар близко к давлению во внутренних слоях Солнца. Плазма в этих условиях ($n_e \approx 4 \times 10^{24}$ см⁻³, $T \approx 8 \times 10^6$ К) невырождена, $n\lambda^3 \approx 0.07$, двенадцатикратно ионизирована, а параметр неидеальности невелик, $\Gamma \sim 0.1$, что служит экспериментальной иллюстрацией тезиса об упрощении физических свойств плазмы в пределе ультравысоких плотностей энергии. Исследованный диапазон параметров примыкает к области, где в термодинамике системы заметен вклад энергии и давления равновесного светового излучения: $E_R = 4\sigma T^4/c$; $P_R = E_R/3 = 4/3\sigma T^4/c$. Таким образом, реализуется близкий к радиационно-газодинамическому режим динамики плазмы [4, 27].

Кроме возможности получения сверхвысоких плотностей энергии, эти опыты обладают и рядом других уникальных особенностей. Это широчайший диапазон изменения давления, одномерность и хорошая симметрия проведения измерений с использованием больших образцов, размеры которых на порядки превышают лабораторные. В результате был получен значительный объём бесценной экспериментальной информации в области ультравысоких давлений, к нижнему диапазону которых сейчас приближается техника мощных лазеров [10]. Рекордные в земных условиях плотности энергии плазмы получены именно в ближней зоне ядерного взрыва.

Сверхсильные магнитные поля. Изучение механизмов формирования сверхвысоких плотностей

энергии электрического и магнитного полей — важная задача, стоящая перед исследователями. Российская наука со времён академика П.Л. Капицы занимала лидирующее положение в генерации сильных магнитных полей. Сохранение магнитного потока в замкнутом проводнике при его симметричном сжатии взрывом позволило академику А.Д. Сахарову предложить метод магнитной кумуляции (МК) для реализации сверхсильных магнитных полей [28]. Им же был разработан принцип действия первых взрывомагнитных генераторов. Его суть состоит в следующем. В радиальном генераторе (генератор поля) исходный магнитный поток с индукцией B_0 радиально обжимается металлическим цилиндром, ускоряемым к центру детонацией конденсированного взрывчатого вещества. При условии сохранения магнитного потока $S = H_0 \pi R_0^2 = H \pi R^2$ напряжённость магнитного поля внутри цилиндра $H = H_0 (R_0/R)^2$ достигает многих мегагаусс [29]. Под руководством академика РАН А.И. Павловского разработаны генераторы воспроизводимых сверхсильных магнитных полей десятимегагауссного диапазона и рекорд магнитного поля доведён до 17 МГс [30].

С начала XXI столетия генератор воспроизводимых сверхсильных магнитных полей (МК-1) использовался в серии международных экспериментов “Капица”. Уникальная экспериментальная база Росатома в области сверхсильных магнитных полей, в данном случае выступавшая в качестве центра коллективного пользования, предоставлялась для исследований электронной структуры различных материалов, включая органические металлы, гетероструктуры, магнитные материалы, определения характеристик фазовых переходов, а также критических магнитных полей в высокотемпературных сверхпроводниках [31]. Размещение во внутреннем объёме генератора МК-1 сверхсильных магнитных полей соосного

полого цилиндра из проводящего материала позволяет преобразовать его в генератор для изоэнтروпического сжатия веществ при давлении вплоть до 7 Мбар. С использованием этого генератора исследованы уравнения состояния при изоэнтропическом сжатии изотопов водорода, имеющие важное значение для определения характеристик планет-гигантов [31], и в качестве прикладной задачи – уравнения состояния при изоэнтропическом сжатии конструкционных материалов.

Коллективом под руководством члена-корреспондента РАН В.Д. Селемира ведутся работы по совершенствованию генераторов сверхсильных магнитных полей. В “матрёшке” из вложенных друг в друга генераторов МК-1 реализованы предельные возможности использования энергии взрывчатых веществ и в макрообъёмах $\sim 3 \text{ см}^3$ получено магнитное поле 28 МГс – максимальная величина, которой в макроскопических объёмах пока удалось достичь на Земле (рис. 5). Этим взрывным устройствам принадлежат сегодня рекорды по величине импульсного электрического тока $\approx 300 \text{ МА}$, что соответствует экстремально высокой электромагнитной энергии $H^2/8\pi \approx 3 \text{ МДж/см}^3$. Взрывомагнитные генераторы – наиболее мощные энергетические устройства на сегодня, их мощность достигает $\approx 100 \text{ ТВт}$ [32].

Продвижение в область сверхсильных магнитных полей стомегагауссного диапазона, при котором давление в макрообъёмах порядка нескольких см^3 достигает 400 млн атмосфер, потребует использования энергии атомного взрыва [33].

Исследование метода магнитной кумуляции для формирования импульсов тока позволило создать мощные, до 100 ТВт, энергетические устройства [34]. Эти генераторы применяются для преобразования энергии взрыва в энергию мощных плазменных образований, когерентное и некогерентное световое излучение, мощное микроволновое излучение [32]. Благодаря уникальным энергетическим возможностям магнитокумулятивных генераторов удалось впервые смоделировать воздействие импульса молнии с амплитудой тока в сотни кА на заземляющие устройства [35] и создать подвижные комплексы для применений в практической электроэнергетике [36].

Устройства сильноточной импульсной энергетики ($10^5\text{--}10^7 \text{ А}$) используются для получения плазмы высоких плотностей энергии в экспериментальных постановках. Электрическая энергия может осуществлять прямой импульсный джоулев нагрев (электровзрыв) проводников либо магнитодинамическое сжатие и разогрев плазменных

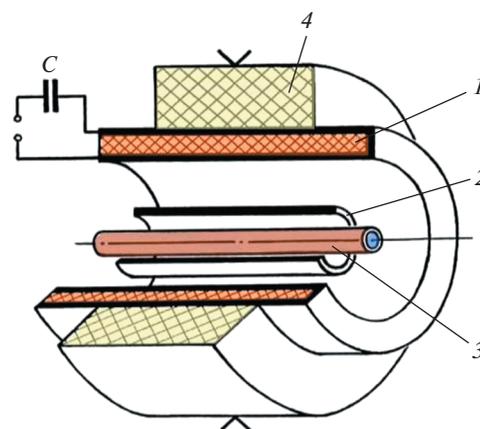


Рис. 5. Схема эксперимента по изоэнтропическому сжатию водорода сверхсильным магнитным полем
1 – соленоид-оболочка МК-1, 2 – каскад, 3 – металлическая трубка с исследуемым веществом, 4 – цилиндрический заряд взрывчатого вещества
Источники: [30, 31].

образований. Запасённая энергия может использоваться для получения интенсивных вспышек мягкого рентгеновского излучения (с радиационной температурой 200–300 эВ) с последующей генерацией этим излучением мощных ударных или радиационных тепловых волн либо для электродинамической генерации ударных волн, а также для электродинамического разгона металлических лайнеров.

Наибольшие параметры плазмы получены в настоящее время в мощных Z-пинчах тераваттного диапазона мощности, в которых электрическая энергия конденсаторов осуществляет электродинамический разгон плазмы с последующей фокусировкой её кинетической энергии на оси цилиндра [37–39]. В этих экспериментах цилиндрическая плазменная оболочка (лайнер) создаётся электровзрывом сотен тонких (6–50 мкм) вольфрамовых проводников током 20 МА с фронтом нарастания порядка 100 нс. При схлопывании вокруг оси была получена вольфрамовая плазма с плотностью ионов порядка 10^{20} см^{-3} и степенью ионизации более 50.

В экспериментах на установке “Ангара” [38–40] (рис. 6) импульсный ток $\approx 4 \text{ МА}$ разгонял плазменный ксеноновый лайнер до скорости $\approx 500 \text{ км/с}$. Высокосимметричный удар этого лайнера о поверхность цилиндрической сильнопористой мишени возбуждал в ней тепловую радиационную волну, излучающую мягкое рентгеновское излучение с температурой порядка 100 эВ. Это излучение использовалось для высокосимметричной генерации плоских ударных волн с амплитудой давления $\approx 5 \text{ Мбар}$ для возбуждения



Рис. 6. Импульсный генератор “Ангара-5”, ГНЦ РФ Троцкий институт инновационных и термоядерных исследований госкорпорации “Росатом”
 Источник: [35].

тепловых радиационных волн со скоростью распространения ~ 100 км/с, а также для разгона металлических ударников до 10–12 км/с.

Генерация макроскопических объёмов горячей плазмы. Важная положительная особенность ускоренных пучков заряженных частиц — объём-

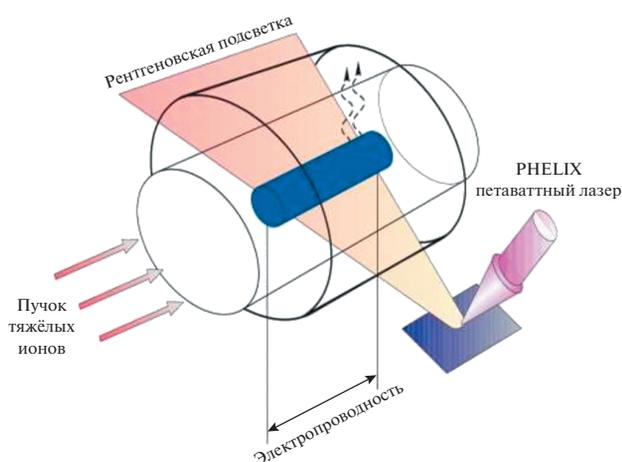


Рис. 7. Схема эксперимента NINEX проекта FAIR с использованием релятивистского пучка тяжёлых ионов и петаваттного лазера
 Источники: [37, 42].

ный характер их энерговыделения [41]. Этим они отличаются от лазерного излучения, где основное энерговыделение с частотой ω_l ограничивается узкой критической зоной [42–44], $\omega_l \sim \omega_p \sim \sim 4\pi e^2 n_e / m_e$ и затем передаётся в глубь мишени благодаря электронной теплопроводности. В результате торможения заряженных частиц возникает слой изохорически разогретой плазмы, последующее расширение которого генерирует ударную волну в глубь мишени или цилиндрическую ударную волну, расходящуюся от оси пучка. В современных исследованиях в области физики высоких плотностей энергии используются обе эти методики — изохорический нагрев и сжатие ударными волнами, генерируемыми корпускулярными пучками.

Созданные для экспериментов в области физики высоких энергий ускорители релятивистских тяжёлых ионов оказались перспективными устройствами не только для управляемого термоядерного синтеза с инерционным удержанием, но и для опытов по сжатию и разогреву плотной плазмы [45, 46], то есть для работ по фундаментальной физике плазмы высоких плотностей энергии. Пучки тяжёлых ионов с кинетической энергией 3–300 МэВ на нуклон применялись в экспериментах по нагреву конденсированных и пористых мишеней, по измерению тормозной

способности ионов в плазме, а также по взаимодействию заряженных пучков с ударно-сжатой плазмой, получаемой с помощью взрывных генераторов и мини-взрывных ударных труб [10, 13].

Особый интерес представляет использование тяжёлоионного ускорителя GSI в комбинации с мощной петаваттной лазерной системой PHELIX (рис. 7), что качественно расширяет экспериментальные возможности такого устройства. Перспективы применения ускорительных комплексов GSI в г. Дармштадт (ФРГ) представлены в работах [41, 43]. Интенсивные релятивистские пучки тяжёлых ионов имеют перспективу для генерации плазмы высокой плотности энергии, а также для импульсного термоядерного синтеза.

* * *

Ударно-волновая техника эксперимента играет сегодня ведущую роль в физике высоких плотностей энергии, позволяя получать для многих химических элементов и соединений максимальные динамические давления мегабарного и гигабарного диапазонов. Достигнутый максимум на шесть порядков превосходит давление при ударе пули, на три — давление в центре Земли и оказывается близким к давлению в центральных слоях Солнца и мишенях инерционного термоядерного синтеза. Такие экзотические состояния вещества возникали при рождении нашей Вселенной спустя несколько секунд после Большого взрыва [9, 10]. В определённом смысле можно считать, что, последовательно увеличивая давление и температуру в динамических экспериментах, мы как бы двигаемся вспять по оси времени, приближаясь к моменту рождения Вселенной — Большому взрыву.

Изучение эволюции ранней Вселенной даёт уникальную возможность исследовать высокоэнергетические явления, которые невозможно воссоздать в лаборатории. По современным представлениям [47], эволюция Вселенной во времени проходила крайне неравномерно — сравнительно медленная сейчас, на ранних стадиях она была поразительно быстрой, так что серьёзные качественные изменения состояния занимали доли секунды. Наблюдаемая сейчас Вселенная возникла около 13.7–14 млрд лет назад из некоторого начального сингулярного состояния с бесконечно большими температурой и плотностью и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается до современных размеров, порядка 10^{28} см, и средних температур, порядка 2.7 К. Согласно теории Большого взрыва, дальнейшая эволюция зависит от нынешней скорости расширения Вселенной и средней плотности вещества в ней.

Наука о строении вещества при высоких плотностях энергии и космофизика тесно связаны и взаимно переплетены. И хотя предельные давления лабораторной плазмы пока отличаются от максимальных астрофизических значений на 20–30 порядков, этот разрыв стремительно сокращается, а физические процессы в лаборатории и космосе часто демонстрируют поразительное разнообразие и вместе с тем глубокие аналогии, свидетельствуя как минимум о единстве физических принципов поведения вещества в широчайшем диапазоне плотностей (примерно 42 порядка) и температур (до 10^{13} К).

Достигнутый уровень развития физики высоких плотностей энергии уже сегодня представляет уникальные возможности для решения учёными РАН, Росатома и высшей школы ряда интереснейших фундаментальных и прикладных задач. Исследования изоэнтропического сжатия ряда веществ крайне важны для определения строения как планет Солнечной системы, так и экзопланет. Без изучения электронной структуры материалов невозможен прогресс в разработке новых высокотемпературных сверхпроводников. Не исключено, что первая управляемая термоядерная реакция будет осуществлена при инерциальном термоядерном синтезе. Необходимые для этих исследований давления, напряжённости магнитных полей и температуры можно реализовать только методами физики высоких плотностей энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б.* Кинетика цепного распада урана // ЖЭТФ. 1940. Т. 10. Вып. 5. С. 477–488.
2. Атомный проект СССР. Документы и материалы. Т. 1. 1938–1945 / Под ред. Л.Д. Рябева. М.: Физматлит, 1998.
3. *Форт В.Е.* Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // УФН. 2007. № 4. С. 347–368.
4. *Сахаров А.Д.* Научные труды ОТФ ФИАН. М.: Центрком, 1960.
5. Атомный проект СССР. Документы и материалы. Т. 2. 1945–1954 / Под ред. Л.Д. Рябева. М.: Физматлит, 1999.
6. *Гончаров Г.А., Рябев Л.Д.* О создании первой отечественной атомной бомбы // УФН. 2001. № 1. С. 79–104.
7. *Андрюшин И.А., Илькаев Р.И., Чернышёв А.К.* Решающий шаг к миру. Водородная бомба с атомным обжатием РДС-37. Саров: РФЯЦ ВНИИЭФ, 2010.
8. *Форт В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т.* Физика неидеальной плазмы. М.: Физматлит, 2004.

9. Гинзбург В.Л. О физике и астрофизике. М.: Бюро Квантум, 1995.
10. Фортон В.Е. Физика высоких плотностей энергии. М.: Физматлит, 2013.
11. Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортон В.Е. Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях // УФН. 1984. № 3. С. 395–434.
12. Киржниц Д.А. Экстремальные состояния вещества (сверхвысокие давления и температуры) // УФН. 1971. № 7. С. 489–508.
13. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000.
14. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
15. Альтшулер Л.В., Трунин Р.Ф., Урлин В.Д. и др. Развитие в России динамических методов исследования высоких давлений // УФН. 1999. № 3. С. 323–344.
16. Аврорин Е.Н., Симоненко В.А., Шибаршов Л.И. Физические исследования при ядерных взрывах // УФН. 2006. № 4. С. 449–454.
17. Nellis W.J. Dynamic Compression of Materials: Metalization of Fluid Hydrogen at High Pressures // Rep. Prog. Phys. 2006. V. 69. № 5. P. 1479–1580.
18. Фортон В.Е., Терновой В.Я., Жерноклетов М.В. и др. Ионизация давлением неидеальной плазмы в мегабарном диапазоне динамических давлений // ЖЭТФ. 2003. № 2. С. 288–309.
19. Fortov V.E., Il'kaev R.I. et al. Phase Transition in Strongly Non-ideal Deuterium Plasma, Generated by Quasiisentropic Compression at Megabars // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. P. 185001; Мочалов М.А., Илькаев Р.И., Фортон В.Е. и др. Квазиизэнтропическая сжимаемость сильнонеидеальной плазмы дейтерия при давлениях до 5500 ГПа: эффекты неидеальности и вырождения // ЖЭТФ. 2017. № 3. С. 592–620.
20. Мочалов М.А., Илькаев Р.И., Фортон В.Е. и др. Квазиизэнтропическая сжимаемость дейтерия в области давлений ~ 12 ТПа // Письма в ЖЭТФ. 2018. № 3–4. С. 173–179; Мочалов М.А., Илькаев Р.И., Фортон В.Е. и др. Измерение квазиизэнтропической сжимаемости газообразного гелия при давлениях ~ 10 ТПа // Письма в ЖЭТФ. 2018. № 10. С. 692–696.
21. Трунин Р.Ф., Урлин В.Д., Медведев А.Б. Динамическое сжатие изотопов водорода при мегабарных давлениях // УФН. 2010. № 6. С. 605–622.
22. Альтшулер Л.В. Успехи физики высоких давлений // УФН. 1970. № 4. С. 721–723.
23. Трунин Р.Ф. Ударная сжимаемость конденсированных веществ в мощных ударных волнах подземных ядерных взрывов // УФН. 1994. № 11. С. 1215–1237.
24. Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Трунин Р.Ф., Фортон В.Е. Экспериментальные данные по ударной сжимаемости и адиабатическому расширению конденсированных веществ при высоких плотностях энергии. Черноголовка: ИХФ РАН, 1996.
25. Илькаев Р.И. О фундаментальных физических исследованиях во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики // УФН. 2011. № 4. С. 405–410.
26. Аврорин Е.Н., Водолага Б.К., Симоненко В.А., Фортон В.Е. Мощные ударные волны и экстремальные состояния вещества // УФН. 1993. № 5. С. 1–34.
27. Аврорин Е.Н. и др. Экспериментальное изучение оболочечных эффектов на ударных адиабатах конденсированных веществ // ЖЭТФ. 1987. № 2. С. 613–626.
28. Сахаров А.Д. Взрывомагнитные генераторы // УФН. 1966. № 4. С. 725–734.
29. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2002.
30. Павловский А.И., Быков А.И., Колокольчиков Н.П. и др. Генерация воспроизводимых импульсных магнитных полей до 20 МГс // Доклады АН. 1994. Т. 334. № 3. С. 300–303.
31. Борисков Г.В., Быков А.И., Долощенко М.И. и др. Физические исследования в сверхсильных магнитных полях // УФН. 2011. № 4. С. 441–447.
32. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии. Т. 1, 2 / Под ред. В.А. Демидова, Л.Н. Пляшкевича, В.Д. Селемира. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2020.
33. Таценко О.М., Селемир В.Д., Моисеенко А.К. и др. Оптические устройства измерений в физике высоких плотностей энергии / Под ред. В.Д. Селемира, О.М. Таценко, Ю.Б. Кудасова. Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2020.
34. Гриневиц Б.Е., Демидов В.А., Ивановский А.В., Селемир В.Д. Взрывомагнитные генераторы энергии и их применение в научных экспериментах // УФН. 2011. № 4. С. 422–427.
35. Вилков Ю.В., Кравченко А.С., Селемир В.Д., Терехин В.А. Моделирование воздействия токового импульса молнии с помощью источников энергии на основе магнитокумулятивных генераторов // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 88–97.
36. Fortov V.E., Kozlov A.V., Shurupov A.V. et al. The Sources of Pulse Current Based on Explosive Magnetic Generators for Mobile Testing Facility // IEEE Transactions on Plasma Science. 2016. V. 44. P. 1956–1960.
37. Jones B., Ampleford D.J., Vesey R.A. et al. Planar wire-array Z-pinch implosion dynamics and X-ray scaling at multiple-MA drive currents for a compact multisource hohlraum configuration // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 125001–125004.
38. Гасилов В.А., Захаров С.В., Смирнов В.П. О генерации мощных потоков излучения и получении мегабарных давлений в лайнерных системах // Письма в ЖЭТФ. 1991. № 2. С. 83–86.
39. Грабовский Е.В., Воробьев О.Ю., Дябилин К.С. и др. Генерация мощных ударных волн мягким рентгеновским излучением плазмы Z-пинча // Письма в ЖЭТФ. 1994. № 1. С. 3–7.
40. Абрамов О.Н., Александров В.В., Волков Г.С. и др. Исследование динамики сжатия волоконного лайнера с установленной на оси дейтерированной мишенью // Физика плазмы. 2020. № 10. С. 879–889.

41. *Фортвов В.Е., Хоффманн Д., Шарков Б.Ю.* Интенсивные ионные пучки для генерации экстремальных состояний вещества // УФН. 2008. № 2. С. 113–138.
42. *Анисимов С.И., Прохоров А.М., Фортвов В.Е.* Применение мощных лазеров для исследования вещества при сверхвысоких давлениях // УФН. 1984. № 3. С. 395–434.
43. *Atzeni S., Meyer-ter-Vehen J.* The Physics of Inertial Fusion. Oxford: Clarendon Press, 2004.
44. *Lindle J.* Inertial Confinement Fusion. N.Y.: Springer, 1998.
45. Ядерный синтез с инерционным удержанием / Под ред. Б.Ю. Шаркова. М.: Физматлит, 2005.
46. *Tahir N.A., Deutsch C., Fortov V.E. et al.* Studies of strongly coupled plasmas using intense heavy ion beams at the future FAIR facility: the HEDgeHOV collaboration // Contrib. Plasma Phys. 2005. V. 45. № 3–4. P. 229–235.
47. *Хокинг С.* Краткая история времени. От Большого взрыва до чёрных дыр. СПб.: Амфора, 2007.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

МОЩНЫЕ ЛАЗЕРЫ ДЛЯ ФИЗИКИ
ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ

© 2021 г. С. Г. Гаранин^{a,*}, С. В. Гарнов^{b,**}, А. М. Сергеев^{c,***}, Е. А. Хазанов^{c,****}

^a Институт лазерно-физических исследований Российского федерального ядерного центра
“Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики”, Саров, Россия

^b Федеральный исследовательский центр “Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН”, Москва, Россия

^c Федеральный исследовательский центр “Институт прикладной физики РАН”, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: garanin@vniief.ru

**E-mail: garnov@kapella.gpi.ru

***E-mail: ams@ufp.appl.sci-nnov.ru

****E-mail: khazanov@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 13.02.2021 г.

После доработки 18.02.2021 г.

Принята к публикации 03.03.2021 г.

В статье рассматриваются основные результаты исследований по лазерной физике и физике высоких плотностей энергии, проведённых учёными академических институтов и предприятий атомной отрасли. Представлены проекты создания перспективной экспериментальной лазерной базы, перечислены направления предстоящих работ.

Ключевые слова: лазерный термоядерный синтез, физика высоких плотностей энергии.

DOI: 10.31857/S0869587321050108

Лазер является уникальным устройством, энергию излучения которого можно сконцентрировать в малом объёме. В результате открывается возможность проведения физических экспериментов в области высоких плотностей энергии. За последние шесть десятилетий, прошедших со времени изобретения лазера [1], выполнен большой объём исследований механизмов взаимодействия лазерного излучения с веществом, изучены свойства высокотемпературной плотной плазмы, обоснованы подходы к использованию лазера для зажигания термоядерного горючего в условиях лаборатории и решения на этой основе проблемы

ГАРАНИН Сергей Григорьевич – академик РАН, генеральный конструктор по лазерным системам, заместитель директора РФЯЦ–ВНИИЭФ, директор ИЛФИ. ГАРНОВ Сергей Владимирович – член-корреспондент РАН, директор ФИЦ ИОФ им. А.М. Прохорова РАН. СЕРГЕЕВ Александр Михайлович – академик РАН, президент РАН, главный научный сотрудник ФИЦ ИПФ РАН. ХАЗАНОВ Ефим Аркадьевич – академик РАН, заместитель директора по научной работе, руководитель отделения нелинейной динамики и оптики ФИЦ ИПФ РАН.

управляемого термоядерного синтеза. Предложены подходы к перспективным экспериментам в области лабораторной астрофизики, физики вакуума, а также в целях изучения поведения веществ в экстремальных состояниях, создания компактных ускорителей.

Для решения этих задач физики-лазерщики создали мощные источники излучения, обеспечивающие его генерацию в диапазоне от рентгеновской до дальней инфракрасной области спектра. Для генерации используются активные среды во всех их агрегатных состояниях, а для накачки применяются различные источники энергии – от диодов до взрыва. Разработаны способы получения лазерного излучения произвольной временной формы – от импульсного фемтосекундной длительности до непрерывной генерации.

Существенный вклад в развитие как собственно физики лазеров, так и в проведение с их помощью исследований в области физики высоких плотностей энергии внесли учёные академических институтов и предприятий атомной отрасли нашей страны. При этом значительная часть уни-

кальных результатов получена в ходе их совместных расчётных и экспериментальных исследований.

В 1965 г. по инициативе академиков Ю.Б. Харитона и Н.Г. Басова во ВНИИЭФе начались работы по созданию лазеров с максимально достижимой энергией на базе взрывных фотодиссоционных йодных лазеров (ВФДЛ), в которых для получения инверсии используется излучение фронта ударной волны, генерируемой в инертном газе взрывом взрывчатого вещества. Эксперименты выполнялись большим коллективом исследователей под руководством члена-корреспондента АН СССР С.Б. Кормера. На основе указанного принципа во ВНИИЭФе, в кооперации с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева АН СССР и Государственным оптическим институтом им. С.И. Вавилова был реализован лазер мегаджоульного уровня энергии [2]. Параметры его излучения оставались рекордными несколько десятков лет вплоть до запуска в 2009 г. в США установки NIF (National Ignition Facility) с энергией импульса 1.8 МДж [3]. Дальнейшее развитие работ по ВФДЛ, в том числе оптимизация лазерной среды и применение устройства обращения волнового фронта для компенсации оптических неоднородностей, позволило получить практически дифракционную расходимость излучения и сконструировать лазеры с рекордной силой излучения 10^{14} Дж/см (10^{19} Вт/см) [4].

В начале 1970-х годов под руководством академиков Н.Г. Басова и Ю.Б. Харитона, членов-корреспондентов АН СССР В.Л. Тальрозе и С.Б. Кормера в Советском Союзе началась разработка мощных химических фтор-водородных лазеров. Результатом стало получение излучения с рекордным значением удельной энергии, приходящейся на единицу объёма активной среды, — 240 Дж/л [5], а также создание во ВНИИЭФе совместно с Государственным институтом прикладной химии (ныне Российский научный центр “Прикладная химия”) самого мощного в мире химического лазера с энергией импульса 40 кДж [6].

Важным этапом совместных работ АН СССР и Министерства среднего машиностроения СССР явились исследования по физике мощных химических кислородно-йодных лазеров, стартовавшие во ВНИИЭФе в 1981 г. по инициативе С.Б. Кормера. Совместно с Самарским филиалом ФИАНа в итоге удалось построить стенд непрерывного мультикиловаттного уровня мощности с рекордным уровнем химической эффективности 34% [7].

Ключевое направление физики высоких плотностей энергии — поиск возможностей реализации управляемого термоядерного синтеза (УТС). В его рамках проводятся широкомасштабные

расчётные и экспериментальные исследования процессов лазерно-плазменного взаимодействия и поведения вещества в экстремальных состояниях. Специалисты РАН и ГК “Росатом” вносят существенный вклад в эти работы, о чём подробнее будет сказано ниже. Отметим, что для развития исследований в области УТС в России предусмотрена реализация четырёх крупных проектов. Будут построены:

- в РФЯЦ–ВНИИЭФ — мощная лазерная установка мегаджоульного уровня энергии для осуществления зажигания термоядерного горючего в лабораторных условиях (рис. 1а);

- в ИПФ РАН — лазерный комплекс XCEL экзаваттного уровня мощности с фемтосекундной длительностью лазерного импульса для исследования поведения вещества при сверхвысоких давлениях и сверхсильных магнитных полях, физики вакуума и создания компактных ускорителей заряженных частиц (рис. 1б);

- в Троицком институте инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ) ГК “Росатом” — лазерная система “Частота”, которая позволит получать наносекундные лазерные импульсы с частотой следования 10 Гц и энергией порядка 1 кДж, для отработки технологии создания драйвера лазерной термоядерной электростанции (рис. 1в);

- в НИЯУ МИФИ — установка “Эльф” для исследований высоких плотностей энергии и подготовки кадров в области лазерной физики и лазерного термоядерного синтеза (рис. 1г).

Исследования физики термоядерной плазмы. В земных условиях эффективное горение термоядерного горючего впервые было продемонстрировано в начале 1950-х годов при испытании термоядерного оружия. Ещё раньше, в 1950 г., А.Д. Сахаров и И.Е. Тамм выдвинули идею удержания и термоизоляции плазмы с помощью магнитного поля, после чего стали интенсивно развиваться исследования по управляемому термоядерному синтезу на основе схем с магнитным удержанием плазмы.

Изобретение лазера в начале 1960-х годов инициировало предложения по его использованию для зажигания термоядерного горючего в лабораторных условиях. В СССР такие предложения практически одновременно независимо одно от другого были сформулированы в ФИАНе и ВНИИЭФе. По воспоминаниям коллег академика А.Д. Сахарова [8], на семинаре во ВНИИЭФе он предложил эллиптическую схему лазерного облучения маленькой оболочки, содержащей термоядерное топливо. Это предложение не было опубликовано, а первой опубликованной работой по использованию лазера для нагрева термоядерной смеси стала статья академиков Н.Г. Басова и О.Н. Крохина

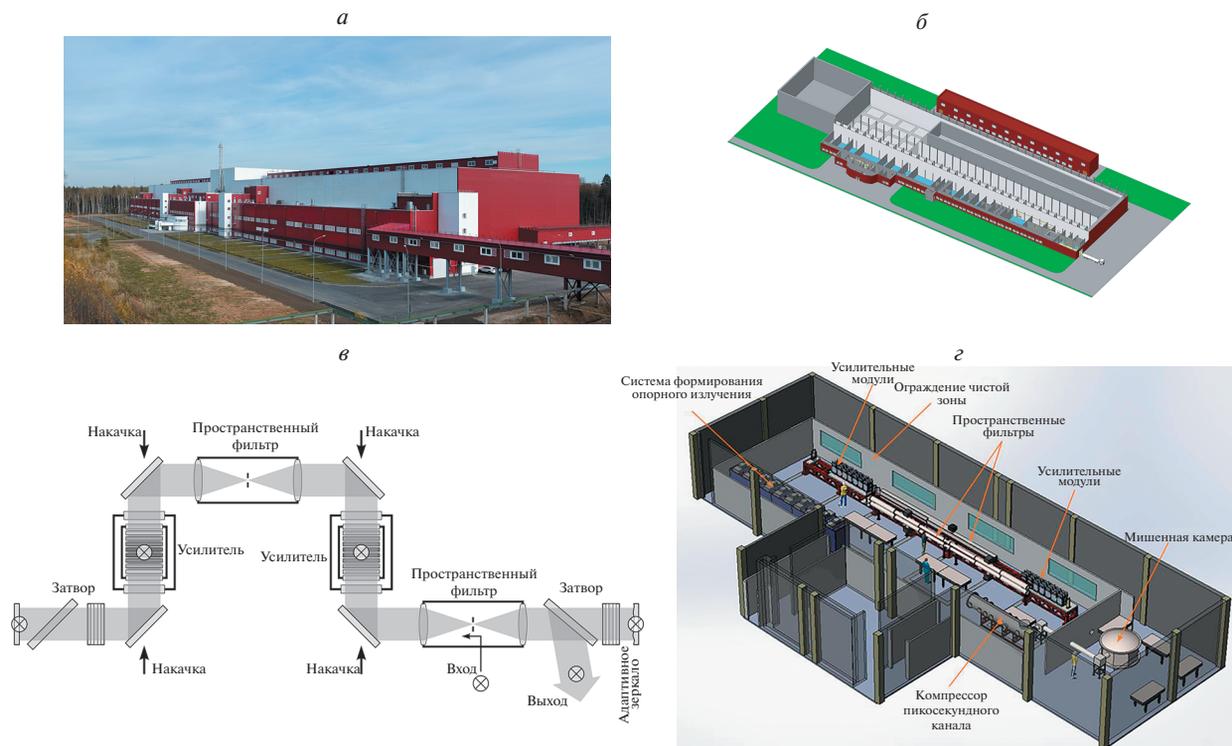


Рис. 1. Создаваемые в России перспективные лазерные системы: *а* – установка мегаджоульного уровня энергии, *б* – экзаваттный комплекс XCEL, *в* – принципиальная схема канала частотного лазера, *г* – установка “Эльф”

[9]. Несколько позже была опубликована статья их американских коллег [10].

Эти идеи дали старт созданию в нашей стране и за рубежом семейства лазерных установок для исследования физики термоядерной плазмы и возможности зажигания с помощью лазера термоядерного горючего. В нашей стране эти эксперименты проводились на установках “Дельфин” [11], “Кальмар” [12] (обе – ФИАН), “УМИ-35” [13] (ИОФАН), “Искра-4” [14] и “Искра-5” [15] (ВНИИЭФ), “Прогресс” [16] (ГОИ), “Сокол” [17] (ВНИИТФ). Работами руководили выдающие советские учёные Н.Г. Басов, Ю.Б. Харитон, С.Б. Кормер, О.Н. Крохин, Г.А. Кириллов, А.А. Мак.

К концу 1990-х годов ведущими мировыми лабораториями были получены принципиальные результаты, демонстрирующие возможность достижения отдельных параметров, необходимых для зажигания лазерной микромишени: получено $\geq 10^{14}$ ДТ-нейтронов за импульс [18]; осуществлено близкое к сферически-симметричному объёмное сжатие дейтерий-тритиевого газа в 10^3 – 10^4 раз [19–21]; при объёмных сжатиях $\leq 10^3$ реализован нагрев дейтерий-тритиевой плазмы до температур 5–7 кэВ [18–21]. Также были выполнены расчётные и экспериментальные исследо-

вания по обоснованию облика самого лазера-драйвера.

Вопрос об эффективности поглощения лазерного излучения – один из основных в использовании лазеров для сжатия лазерных мишеней. При высоких интенсивностях ($I \geq 10^{14}$ – 10^{15} Вт/см²), необходимых для получения требуемого давления, разгоняющего сферическую оболочку, взаимодействие лазерного излучения с плазмой носит нелинейный характер. Возрастает роль плазменных неустойчивостей, приводящих, с одной стороны, к снижению энерговыклада лазерной энергии в мишень, а с другой – к генерации быстрых заряженных частиц, которые, имея большой пробег, прогревают дейтерий-тритиевую плазму и снижают эффективность сжатия.

Эти явления исследовались на многих установках в нашей стране и за рубежом, в результате были созданы физические модели, убедительно описывающие совокупность экспериментальных данных. Отметим, что такие модели опираются на теоретические исследования специалистов академических институтов, в первую очередь ФИАНа [22].

На установке “Искра-4” при облучении сферических микромишеней экспериментально изучены коэффициент поглощения и доля

энергии лазерного излучения на поверхности мишени, переданная быстрым ионам. Полученные данные подтвердили, что при $\Lambda^2 \approx (5 \times 10^{14} - 5 \times 10^{15}) \text{ Вт/см}^2 \text{ мкм}^2$ наблюдается снижение коэффициента поглощения лазерного излучения мишенью и до 40% энергии передаётся быстрым ионам.

Ещё одна важная задача, требующая решения для осуществления лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), — обеспечение режима высокооднородного сферически симметричного обжатия лазерной мишени. Эксперименты по исследованию влияния асимметрии на динамику сжатия были выполнены во ВНИИЭФе на 12-канальной установке “Искра-5” мощностью 120 ТВт на базе фотодиссоционного йодного лазера. В момент запуска в 1989 г. она уступала по мощности только установке Nova (США) [23].

На первом этапе проведены экспериментальные и расчётные исследования конструкции бокса-конвертера излучения, обеспечивающего наибольшую однородность облучения центральной капсулы [24]. Использовались мишени непрямого облучения, состоящие из медного бокса диаметром от 2 до 4 мм, в центре которого помещалась стеклянная капсула диаметром от 270 до 900 мкм. Показано, что при соотношении радиусов бокса и капсулы в диапазоне 5–10 раз достигалась неоднородность рентгеновского потока на поверхности капсулы <3%. При этом эффективная температура рентгеновского излучения (РИ) в боксе доходила до 170 эВ, а нейтронный выход из мишеней в DD-нейтронах — до 10^{10} за импульс, не обнаруживая существенных отклонений от одномерного поведения вплоть до объёмных сжатий $\approx 2 \times 10^3$ [25]. При больших степенях сжатия снижение нейтронного выхода по отношению к сферически-симметричному случаю было объяснено влиянием турбулентного перемешивания. Исследование влияния крупномасштабной асимметрии на сжатие и генерацию нейтронного выхода [26] показало хорошее соответствие экспериментальных результатов с двумерными газодинамическими расчётами на основе методики МИМОЗА-НД [27].

Таким образом, комплекс экспериментальных и расчётных работ, проведённых к началу XXI в., позволил уточнить формулировки требований к облику установки для реализации зажигания термоядерного топлива [3, 28, 29]. Одновременно была продемонстрирована готовность всех необходимых технологий для осуществления таких проектов. Теперь в повестке дня стояла задача создания многоканальных (до ~200 каналов) лазерных систем на неодимовом фосфатном стекле с энергией в несколько мегаджоулей, преобразованием излучения во вторую или третью гармонику, профилированной формой импульса и неодно-

родностью облучения дейтерий-тритиевой мишени менее 1–2%.

В России для отработки основных технических решений такого проекта в 2001 г. была введена в эксплуатацию четырёхканальная установка на неодимовом стекле “Луч” [30], на которой в уменьшенной световой апертуре пучка ($18.5 \times 18.5 \text{ см}$) получена энергия 3.3 кДж с канала, управляемая временная форма лазерного импульса и обеспечена повторяемость энергетических и временных параметров излучения на выходе усилительного канала на уровне менее 5%. При этом пространственная неоднородность пучка по интенсивности составила <20% при расходимости излучения $\approx 4.5 \times 10^{-5}$ радиан и при числе Штреля ~ 0.4 (рис. 2). Для обеспечения высокой однородности излучения разработаны и введены в строй стационарные устройства гомогенизации пучка (фазовые пластины и линзовые растрты). На мишенях достигнута неоднородность огибающей распределения интенсивности пучка менее 5%. Для устранения высокочастотной пространственной модуляции в пятне фокусировки применён задающий генератор с шириной спектра излучения 1 ТГц и оптоволоконным сглаживанием, позволивший уменьшить среднеквадратичное отклонение распределения интенсивности до 1–2% с учётом пространственных масштабов <30 мкм.

Другим направлением исследований, проводимых на установке, стало совершенствование комплексов диагностики параметров лазерного, рентгеновского и корпускулярного излучений. Общая стратегия сводилась к развитию методов регистрации быстропротекающих процессов, в том числе с учётом влияния многочисленных помех.

Не менее важная цель экспериментов — моделирование физических явлений в высокотемпературной плотной лазерной плазме и экспериментальная отработка перспективных конструкций мишеней. На установке “Луч” мишени облучались с целью исследования экстремальных состояний вещества; тестирования программ радиационной газовой динамики; пополнения баз данных в части уравнения состояния материалов; исследования явлений откола и физики прочности, в том числе имея в виду такую важную для землян проблему, как предотвращение астероидной опасности.

Ещё одно направление работ на установке “Луч” — исследование сжимаемости материалов (таких экспериментов проводится более 100 в год). Оценивается ударная и безударная сжимаемость и разгрузка широкого спектра материалов (конденсированные, пористые, оптически прозрачные) [31]. Разработаны новые конструкции мишеней, которые позволяют исследователям продвинуться в мультимегабарный (до 100 Мбар)



Рис. 2. Установка “Луч”

диапазон давлений. В этих целях используются материалы, полученные средствами магнетронного напыления и из механически изготовленных, но сохраняющих свою внутреннюю структуру образцов фольги. В экспериментах 2020 г. продемонстрирован существенный потенциал применения малоплотной пены для повышения давления за фронтом ударной волны. При умеренной интенсивности излучения $I \leq 1.5 \times 10^{13}$ Вт/см² достигнута скорость ударной волны в алюминии более 40 км/с (рис. 3).

В последние годы проведён обширный цикл работ по моделированию (на основе принципа подобия) процессов взрывного разрушения крупных космических объектов – астероидов [32]. Предложен вариант воспроизведения разрушительного воздействия ядерного взрыва с помощью фокусировки мощного импульсного лазерного излучения на мини-макеты, имитирующие реальные небесные тела. С целью определения удельной энергии воздействия на космическое тело выполнены детальные расчёты, учитывающие широкий спектр процессов. При варьировании энергий воздействия порядка нескольких мегатонн для ядерного взрыва и нескольких сотен джоулей для лазерного импульса удалось достигнуть одинаковых по амплитуде и подобных по времени профилей давления в ударно-волновой фазе разрушения астероида и его макета. При разнице в 12–14 порядков по объёму и массе поправочный коэффициент в критерии энергетического подобия составил $k = 1/2$ (удельная энергия ядерного взрыва в 2 раза меньше, чем при применении лазера). В макетах обеспечено их подобие

составу, микро- и макроструктуре, прочностным характеристикам реальных объектов. Для натуральных испытаний использовались и образцы метеоритов. В экспериментах применялись хондритные каменные, железные и ледяные образцы. В широком спектре размеров и форм получены данные по необходимой удельной энергии, которая должна быть доставлена к космическому объекту.

Российский проект установки мегаджоульного уровня энергии. Фактически установка “Луч” стала полигоном для отработки основных узлов будущей установки нового поколения и позволила уточнить её параметры. Эти работы начались в 2012 г., и с учётом их масштабности и сложности удалось сформировать широкую кооперацию с участием ведущих организаций ГК “Росатом”, РАН, оптической и электронной промышленности. После доработки проекта была увеличена до ≈ 40 см световая апертура лазерного канала, а их количество доведено до 192. Изменена геометрия облучения мишени. Эти усовершенствования позволили существенно увеличить энергию лазерного излучения на выходе установки и в камере взаимодействия, повысить однородность облучения капсулы с дейтерий-третиевым топливом.

Существенное отличие проектируемой установки от её аналогов в США и Франции – наличие двух камер взаимодействия: основной сферической диаметром 10 м, которая будет работать со всеми пучками, и вспомогательной камеры многофункционального исследовательского комплекса (МИК), работающей с 16 лазерными кана-

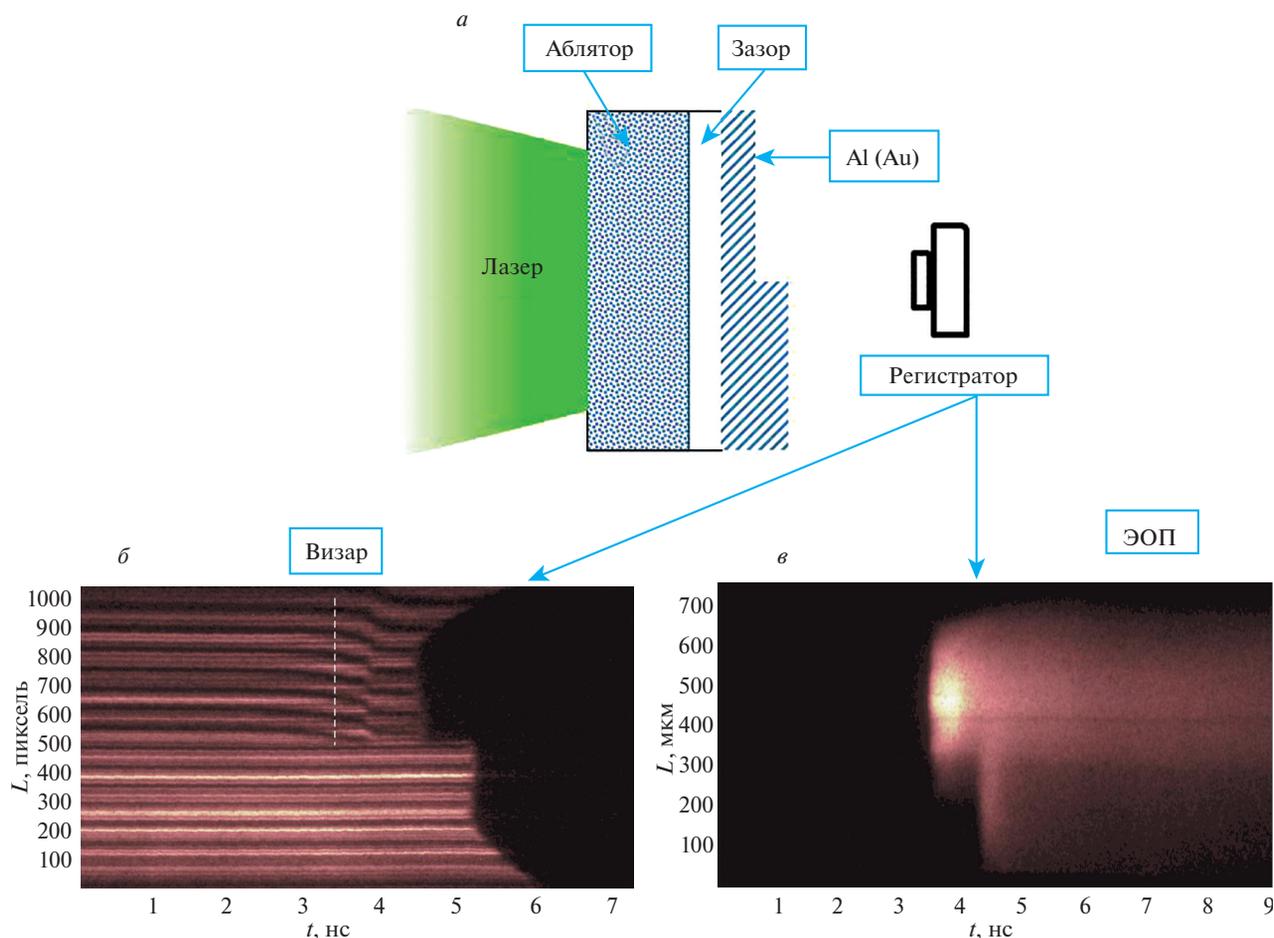


Рис. 3. Постановка экспериментов по гидродинамическому увеличению давления в мишенной конструкции: *a* – на основе малоплотного аблятора, *б* – результаты диагностики предварительного разогрева конструкции, *в* – результаты диагностики регистрируемой скорости ударной волны, времени выхода и светимости материалов мишени

лами при энергии излучения около 200 кДж. Камера оснащена генераторами магнитного поля. Для проведения входного контроля оптических элементов, систем высоковольтной электроники, систем автоматического управления в 2014 г. введён в эксплуатацию современный испытательный комплекс, обеспечивающий сквозной контроль и аттестацию всех составных частей установки. Запущено прецизионное производство мишеней, в том числе термоядерных (рис. 4, 5).

Разработка высокоточных инструментов диагностики также в числе важных направлений исследований. В частности, теневая фазовая интерферометрия плазменных объектов, обладающая высоким временным (несколько фс) и пространственным (несколько мкм) разрешением, позволяет диагностировать динамику сложных 3D плазменных объектов в режиме многокадровой съёмки. Одновременно активно применяются интерферометрические методика ВИЗАР [33] и оптогетеродинамная многоканальная методика

PDV [34], обеспечившие регистрацию динамических процессов в лазерных мишенях с погрешностью измерений скорости менее 1%. Разработаны комплексы для измерения энергетических, спектральных и временных параметров рентгеновского поля, а также параметров разлёта частиц, получаемых в термоядерных реакциях.

В конце 2020 г. здание для размещения установки введено в эксплуатацию. Осуществлён монтаж стапеля, на котором монтируются лазерные модули. Вакуумные камеры взаимодействия установлены на место эксплуатации. Введён в опытную эксплуатацию первый восьмиканальный модуль, на котором начаты эксперименты (рис. 6).

Установки с ультракороткой длительностью излучения. В последние годы наблюдается стремительный прогресс в создании твёрдотельных лазерных систем с импульсами фемтосекундной длительности. В ведущих лазерных лабораториях созданы установки субпетаваттного и петаватт-

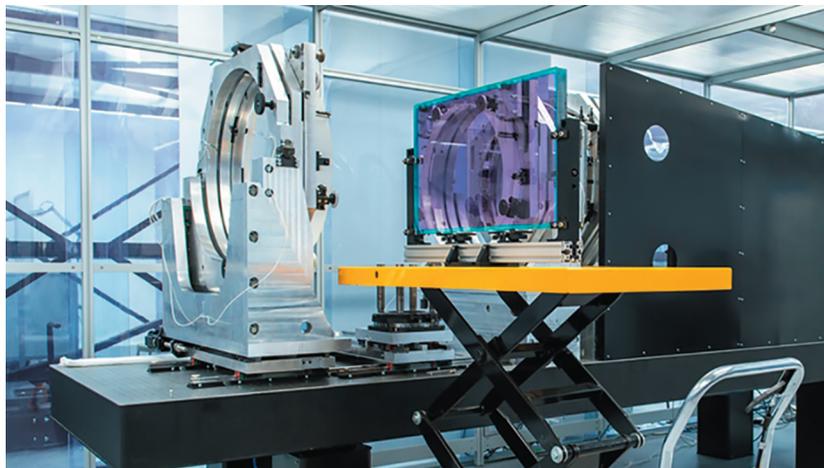


Рис. 4. Широкоапертурный интерферометр фазового сдвига, класс точности – $\lambda/1000$.
Совместная разработка ИПФ РАН и РФЯЦ–ВНИИЭФ

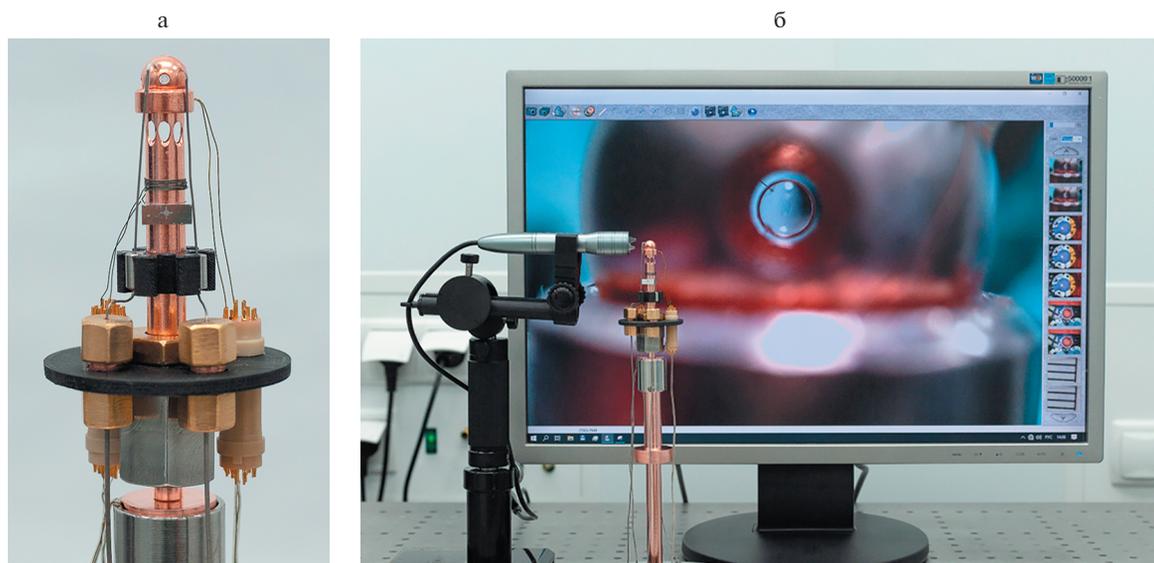


Рис. 5. Мишень непрямого облучения криогенного типа:
а – общий вид, *б* – вид центральной капсулы с дейтерий-третиевым топливом внутри бокса-конвертора

ного уровней мощности [35]. При таких уровнях мощности в сфокусированном пучке достигается интенсивность до 10^{22} Вт/см², что на четыре порядка больше релятивистской интенсивности – интенсивности при которой энергия колебания электронов в поле световой волны оказывается близкой к энергии покоя. Такие релятивистские условия невозможно реализовать в лабораториях другими способами.

Появление нового инструмента способствовало развитию ряда исследовательских направлений. В их числе генерация быстрых электронов и ионов, включая генерацию протонных пучков; генерация жёсткого рентгеновского излучения, инициирование ядерных реакций и др. Различ-

ные научные группы проводят теоретические и экспериментальные исследования с целью определения возможности “быстрого” зажигания термоядерной мишени при одновременном воздействии лазерного излучения наносекундной и фемтосекундной длительности.

Основу короткоимпульсных систем составляет задающий генератор. Он создаёт лазерный импульс фемтосекундной длительности, энергия которого не превышает нескольких наноджоулей. Усилительная схема строится на основе растяжения импульса с использованием дифракционных решёток до наносекундной длительности, усиления и последующей компрессии к исходной форме (при условии сохранения спектральной фор-



Рис. 6. Монтаж сферической вакуумной камеры диаметром 10 м (а), многофункциональная камера МИК (б)

мы излучения при усилении) [36]. В ИПФ РАН в целях усиления излучения предложен способ параметрического преобразования света для создания комплексов такой импульсной мощности [37]. Импульс излучения усиливается в нелинейном анизотропном кристалле за счёт перекачки энергии из волны накачки — в результате генерируется также холостая волна. Перекачка происходит в соответствии с условиями синхронизма в трёхволновом взаимодействии.

Создано два комплекса петаваттного уровня мощности: “Фемта” (Саров) и “Pearl” (Нижний Новгород) [38] (рис. 7). К настоящему времени на этих установках выполнен большой объём работ. В частности, в Институте прикладной физики РАН получены результаты по сверхкомпрессии лазерного импульса ультракороткой длительности. Для этого могут применяться методы обогащения спектра, в том числе и на финальной стадии, после компрессии излучения [39]. В ИПФ РАН для этого впервые применена тонкая кварцевая пластина (3 мм), нагружаемая лазерным полем мощностью 250 ТВт. Из-за фазовой само модуля-

ции в стекле и последующего отражения от дисперсионных зеркал получено 5-кратное укорочение импульса (с 70 до 14 пс) при минимальных потерях энергии (несколько процентов) [40].

Примером последних работ на установке “Pearl” служат исследования плазменных течений в сильном магнитном поле с целью моделирования ряда астрофизических процессов [41]. Для формирования плазмы использовалось сфокусированное на мишени излучение наносекундной длительности. Импульсное (несколько миллизекунд) магнитное поле амплитудой в десятки тесла формировалось токопроводящими катушками Гельмгольца. Динамика движения плазмы регистрировалась интерферометрическим способом с использованием импульсного излучения фемтосекундной длительности, что позволяло осуществлять диагностическую съёмку с минимальной временной экспозицией и высоким пространственным разрешением. Проведено исследование разных этапов взаимодействия с полем: первого, когда газодинамическое давление превышает магнитное, второго, когда давления примерно равны — это время развития неустойчивостей на границе области плазмы, и третьего, когда плазма вытесняется магнитным полем и формируется плоская геометрия течения плазмы, ориентированного продольно линиям поля (рис. 8).

Результаты работ по созданию петаваттных лазерных комплексов в Сарове и Нижнем Новгороде были положены в основу проекта самого мощного в мире субэкзаваттного лазера XCELS, который включён Правительством РФ в число проектов класса мегасайенс, планируемых к реализации в текущем десятилетии. Установка будет иметь интенсивность облучения $> 10^{25}$ Вт/см². Научная программа предстоящих работ весьма амбициозна, её перспективная повестка включает:

- создание сверхъярких источников в рентгеновском и гамма-диапазонах;



Рис. 7. Установка Pearl

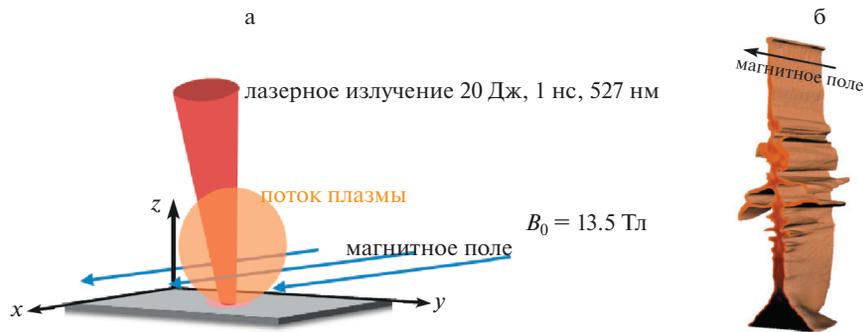


Рис. 8. Геометрия эксперимента (а), структура магнитно-ориентированного плазменного течения (б)

- создание компактных ускорителей электронов (до 100 ГэВ) и ионов (10 ГэВ);
- исследования экстремальных состояний вещества в ультрарелятивистских полях;
- моделирование астрофизических и ранних космологических явлений;
- создание электромагнитных источников аттосекундной и субаттосекундной длительности;
- получение источника излучения с пиковой мощностью более 1 ЭВт;
- исследование пространственно-временной структуры вакуума;
- создание вещества и антивещества;
- возбуждение и диагностика внутриядерных процессов.

Перспективы работ. Локомотивом развития лазерных технологий с момента изобретения служила идея постройки на их основе лазерной термоядерной или гибридной электростанции. Важный шаг в этом направлении — создание установки, обеспечивающей одновременно высокую энергию излучения и частоту повторения импульсов. В настоящее время в мире разрабатываются проекты твердотельных лазерных систем с энергией импульса от 1 до 10 кДж в канале и частотой 10–20 Гц [42], однако экспериментально достигнутые уровни энергии существенно ниже [43], а существующие установки с требуемыми энергиями импульсов не могут функционировать в частотном режиме.

Развитие технологий диодной накачки, криогенного охлаждения усилителей и адаптивного управления формой волнового фронта позволяет на основе новых физических принципов и конструкторских решений создать уже сегодня импульсно-периодический лазер требуемого класса. С этой целью «Росатом» в 2019 г. приступил к разработке установки для решения перспективных задач термоядерной/гибридной энергетики. Программа работ предполагает развитие ключевых технологий частотного канала, отработ-

ки концепции его построения и создание инфраструктуры. Проект реализуется на базе российских технологий и стимулирует развитие ряда сопряжённых программ. Разрабатываются системы, способные функционировать в частотном режиме с высокой средней мощностью лазерного излучения, в их числе широкоапертурная ячейка Поккельса, вакуумный пространственный фильтр, адаптивная система, устройства фазировки излучения каналов. Проводятся исследования в интересах технологий создания источников диодной накачки с повышенной мощностью, керамических активных элементов Yb:YAG высокого оптического качества и большого размера, систем криогенного охлаждения активных элементов. В настоящее время проходит этап макетирования дискового усилителя — конструктивно главного и наиболее технически сложного элемента канала частотной установки. Проведены испытания системы диодной накачки и образцов активных сред из Yb:YAG-керамики.

Нельзя не упомянуть, что в перечень важнейших направлений работ входит подготовка квалифицированных кадров в области лазерно-физических исследований. Для решения этой задачи на базе НИЯУ–МИФИ с участием РФЯЦ–ВНИИЭФ, ИОФ РАН и ИПФ РАН активно реализуется новый проект по созданию лазерного центра «Эльф» [44]. В его установке используется оригинальная концепция последовательного усиления в режиме сильного насыщения, которая обещает существенное увеличение эффективности генерации энергии — на выходе двухканальной усилительной установки энергия составит 7 кДж/канал при апертуре пучка 22 см и длительности импульса излучения в единицы наносекунд. Одновременно, как показывают расчётные исследования, ожидается более чем двукратное улучшение (относительно систем с аналогичной плотностью энергии) качества излучения в ближней и дальней зонах. На установке впервые в современной практике будет реализована концепция нано-, пико- и фемтосекундных

опций по длительности импульсного излучения одновременно.

* * *

Созданная в России лазерная стендовая база уникальна. ГК “Росатом” и РАН проводят масштабные работы по созданию современных лазерных установок. Координация усилий для решения перспективных задач обеспечила реализацию амбициозных проектов совместных фундаментальных и прикладных исследований. На их основе проводится подготовка высококвалифицированных специалистов в области лазерных технологий, физике плазмы и экстремального состояния вещества. Интенсивно развивается научно-исследовательская база вузов.

Ввод российских установок класса мегасайенс в эксплуатацию потенциально обеспечит возможность моделирования всех актуальных задач физики и термоядерной энергетики. Сопоставление полученной экспериментально информации с результатами расчётов по существующим и модернизированным программам позволит оценить полноту физических моделей, на которых базируются расчётные методики, и точность математических алгоритмов и программ, их реализующих.

ЛИТЕРАТУРА

1. Townes Ch.H. A Century of Nature: Twenty-One Discoveries that Changed Science and the World. Chicago: University of Chicago Press, 2003.
2. Зуев В.С. Фотодиссоционный лазер с накачкой ударной и тепловой волнами. М.: ФИАН, 1990.
3. Moses E.I., Wuest C.R. The National Ignition Facility: Laser Performance and First Experiments // Fusion Science and Technology. 2005. V. 47(3). P. 314–322.
4. Корнер С.Б., Кочемасов Г.Г., Куликов С.М. и др. Применение нелинейных процессов для формирования субнаносекундных высококонтрастных лазерных импульсов // ЖЭТФ. 1982. Т. 82. № 4. С. 1079–1091.
5. Борисов В.П., Бурцев В.В., Великанов С.Д. и др. Импульсный химический лазер с иницированием реакции мощными световыми источниками // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 4. С. 323–325.
6. Кириллов Г.А. Пособие по физике лазеров. Саров: Изд-во РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2016.
7. Адаменков А.А., Бакишин В.В., Богачёв А.В. и др. Стенд для изучения перспектив промышленного применения кислородно-йодного лазера // Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 7. С. 601–602.
8. Попов Н.А. АДС и ЛТС // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1992. Вып. 4. С. 53–54.
9. Басов Н.Г., Крохин О.Н. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора // ЖЭТФ. 1964. Т. 46. № 1. С. 171–175.
10. Nuckols J., Wood L., Thiessen A., Zimmerman G. Laser Compression of Matter to Super-High Densities: Thermonuclear (CTR) Applications // Nature. 1972. V. 239. P. 139–142.
11. Басов Н.Г., Данилов А.Е., Круглов Б.В. и др. Запуск лазерной термоядерной установки “Дельфин-1” // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 2. С. 395–398.
12. Басов Н.Г., Крохин О.Н., Склизков Г.В. Мощная лазерная установка и исследование эффективности высокотемпературного нагрева плазмы // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. № 1. С. 203–212.
13. Aver'yanov K.P., Avilov Yu.S., Aleksandrov V.V. et al. UMI-35 laser device for the researches in the controlled thermonuclear fusion // Proceedings of the XII ECLIM, 20, 1978.
14. Корнер С.Б. Фотодиссоционные лазеры для управляемого термоядерного синтеза // Изв. АН СССР: сер. физ. 1980. № 10. С. 2002–2017.
15. Анненков В.И., Багрецов В.А., Безуглов В.Г. и др. Импульсный лазер мощностью 120 ТВт “Искра-5” // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. № 5. С. 536–537.
16. Андреев А.А., Анушин М.Г., Бородин В.Г. и др. Результаты ЛТС-экспериментов на установке “Прогресс” и их интерпретация // ЖЭТФ. 1989. Т. 95. № 2. С. 528–535.
17. Воленко В.В., Зуев А.И., Иванов А.Ф. и др. Рентгеновские изображения стеклянных газонаполненных микросфер, облучаемых на лазерной установке “Сокол” // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. № 11. С. 2350–2352.
18. Initial Target Experiments on the Upgraded OMEGA Laser System // LLE Review, Quarterly Report. 1996. V. 64. P. 145–154.
19. Marshall F.J., Delettrez J.A., Epstein R. et al. Direct-drive high-convergence-ratio implosion studies on the OMEGA laser system // Physics of Plasmas. 2000. V. 7(5). P. 2108–2113.
20. Cable M.D., Hatchett S.P., Caird J.A. et al. Indirectly Driven, High Convergence Inertial Confinement Fusion Implosions // Physical Review Letters. 1994. V. 43. P. 2316–2319.
21. Kochemasov G.G. Laser Interaction with Matter // Proceedings of the XXIII ECLIM, 17, 1994.
22. Силин В.П. Поглощение излучения турбулентной лазерной плазмой // УФН. 1995. Т. 145. С. 225–253.
23. Campbell E.M., Hant J.T., Bliss E.S. et al. Nova experimental facility // Review of Scientific Instruments. 1986. V. 57. P. 2101–2106.
24. Абзаев Ф.М., Бельков С.А., Бессараб А.В. и др. Сжатие и нагрев сферических термоядерных мишеней при непрямом (рентгеновском) облучении на установке “Искра-5” // ЖЭТФ. 1998. Т. 114. № 1(7). С. 155–170.
25. П'каев Р.И., Фортон В.Е. The Application of Lasers to Study Extreme States of Matter // Herald of the RAS. 2011. № 3. P. 218–222; Илькаев Р.И., Фортон В.Е. Применение лазеров для изучения экстремальных состояний вещества // Вестник РАН. 2011. № 6. С. 509–513.

26. *Bel'kov S.A., Bessarab A.V., Gaigash V.A. et al.* Study of the shell's large-scale asymmetry influence on the target dynamics using the ISKRA-5 facility // *Laser and Particle Beams*. 1999. V. 17(3). P. 385–390.
27. *Софронов И.Д., Бельков С.А., Винокуров О.А. и др.* Методика расчёта спектрального переноса излучения в двумерном комплексе МИМОЗА-НД // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов*. 2000. Вып. 1. С. 8–15.
28. *Ebrardt J., Chaput J.M.* LMJ project status // *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. V. 112 (3). P. 032005–4.
29. *Galakhov I.V., Garanin S.G., Eroshenko V.A. et al.* Concept of the Iskra-6 Nd-laser facility // *Fusion Engineering and Design*. 1999. V. 44. P. 51–56.
30. *Гаранин С.Г., Зарецкий А.И., Илькаев Р.И. и др.* Канал мощной установки “Луч” для ЛТС с энергией импульса 3.3 кДж и длительностью 4 нс // *Квантовая электроника*. 2005. Т. 35. № 4. P. 299–301.
31. *Bel'kov S.A., Derkach V.N., Garanin S.G. et al.* Isentropic expansion of copper plasma in Mbar pressure range at “Luch” laser facility // *Journal of Applied Physics*. 2014. V. 115(3). P. 033506–7.
32. *Аристова Е.Ю., Аушев А.А., Баранов В.К. и др.* Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды // *ЖЭТФ*. 2018. Т. 153. № 1. P. 157–172.
33. *Celliers P.M., Bradley D.K., Collins G.W., Hicks D.G.* Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility // *Review of Scientific Instruments*. 2004. V. 75 (11). P. 4916–4929.
34. *Strand O., Goosman D., Martinez C. et al.* Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques // *Review of Scientific Instruments*. 2006. V. 77 (8). P. 083108–8.
35. *Danson C., Hiller D., Hopps N., Neely D.* Petawatt class lasers worldwide // *High Power Laser Science and Engineering*. 2015. V.3(3). P. 1–14.
36. *Strickland D., Mourou G.* Compression of amplified chirped optical pulses // *Optics Communications*. 1985. V. 56(3). P. 219–221.
37. *Зуев А.С., Гинзбург В.Н., Кочетков А.А. и др.* Стретчер Оффнера для лазерного комплекса PEARL // *Квантовая электроника*. 2017. Т. 47. № 8. P. 705–710.
38. *Lozhkarev V.V., Freidman G.I., Ginzburg V.N. et al.* Compact 0.56 Petawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification in KD*P crystals // *Laser Physics Letters*. 2007. V. 4(6). P. 421–427.
39. *Хазанов Е.А., Миронов С.Ю., Муру Ж.* Нелинейное сжатие сверхмощных лазерных импульсов: компрессия после компрессора // *УФН*. 2019. Т. 189. С. 1173–1200.
40. *Гинзбург В.Н., Яковлев И.В., Зуев А.С. и др.* Двухкаскадное нелинейное укорочение мощных фемтосекундных лазерных импульсов // *Квантовая электроника*. 2020. Т. 50. № 4. С. 331–334.
41. *Khlar B., Revet G., Ciardi A. et al.* Laser-produced magnetic-Rayleigh-Taylor unstable plasma slabs in a 20 T magnetic field // *Physical Review Letters*. 2019. V. 123. P. 205001–6.
42. *Moses E., Rubia D., Latkowski J.F. et al.* A sustainable nuclear fuel cycle based on Laser Inertial Fusion Energy (LIFE) // *Fusion Science and Technology*. 2009. V. 56(2). P. 566–572.
43. *Banerjee S., Mason P.D., Ertel K. et al.* 100J-level nanosecond pulsed diode pumped solid state laser // *Optics Letters*. 2016. V. 41(9). P. 2089–2092.
44. *Бельков С.А., Воронич И.Н., Гаранин С.Г. и др.* Лазерная установка на Nd-стекле с предельными характеристиками по концентрации излучения для проведения исследований экстремальных состояний вещества и в интересах ЛТС // *Международная конференция “XIII Забабахинские научные чтения” (тезисы)*. 2017.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

© 2021 г. С. Н. Лебедев^{a,*}, Б. Н. Четверушкин^{b,**}, Р. М. Шагалиев^{c,***}

^aРоссийский федеральный ядерный центр “Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина”, Снежинск, Россия

^bФедеральный исследовательский центр “Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН”, Москва, Россия

^cРоссийский федеральный ядерный центр “Всероссийский научно-исследовательский институт ядерной физики”, Саров, Россия

*E-mail: lsn1955@mail.ru

**E-mail: office@keldysh.ru

***E-mail: r.m.shagaliev@vniief.ru

Поступила в редакцию 21.02.2021 г.

После доработки 27.02.2021 г.

Принята к публикации 27.02.2021 г.

Вычислительные и информационные технологии с самого момента своего появления играли и играют важную роль в решении проблем, стоящих перед атомной отраслью. Методы математического моделирования широко используются при проектировании ядерных реакторов, исследовании свойств материалов, в том числе их радиационной стойкости, изучении вопросов ядерной безопасности, проектировании АЭС. Информационные технологии востребованы также при моделировании процессов лазерного термоядерного синтеза. Особое внимание в статье уделяется применению вычислительных систем высокой производительности и алгоритмов высокопроизводительных вычислений в фундаментальных и прикладных исследованиях.

Ключевые слова: атомная отрасль, высокопроизводительные вычисления, искусственный интеллект.

DOI: 10.31857/S0869587321050145

Вычислительные и информационные технологии оказывали, оказывают и, несомненно, будут оказывать существенное влияние на развитие атомной отрасли. Обращаясь к истории, надо отметить, что ещё в конце 1940-х годов в Советском Союзе было сформировано несколько групп спе-

циалистов, в задачу которых входило проведение расчётов, связанных с созданием атомного и термоядерного оружия. Эти работы проводились в Математическом институте АН СССР (М.В. Келдыш, И.М. Гельфанд, А.А. Дородницын, Д.Е. Охочимский, К.А. Семендяев),



ЛЕБЕДЕВ Сергей Наркисович – член-корреспондент РАН, начальник научно-теоретического отделения РФЯЦ–ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина. ЧЕТВЕРУШКИН Борис Николаевич – академик РАН, научный руководитель ФИЦ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. ШАГАЛИЕВ Рашит Мирзагалиевич – доктор физико-математических наук, первый заместитель директора Института теоретической и математической физики РФЯЦ–ВНИИЯФ.

Геофизическом институте АН СССР (А.Н. Тихонов, А.А. Самарский), КБ-11 (Арзамас-16) (Н.Н. Боголюбов, В.С. Владимиров), в Лаборатории измерительных приборов АН СССР (в настоящее время НИЦ “Курчатовский институт” (С.Л. Соболев), Институте физических проблем АН СССР (И.М. Халатников, Н.С. Мейман), Лаборатории “В” (Обнинск) (Д.С. Блохинцев, Г.И. Марчук), Ленинградском отделении Математического института АН СССР (Л.В. Канторович).

Первоначально, до появления первых ЭВМ, расчёты велись на трофейных немецких электромеханических арифмометрах “Мерседес”. К этой трудоёмкой работе привлекались, как правило, молодые выпускники технических вузов. Результаты, полученные на одном арифмометре, передавались для продолжения на соседние. По сути, этот процесс стал прообразом современных параллельных вычислений.

Сегодня, по прошествии многих лет, трудно сказать, насколько расчёты с применением электромеханических устройств ускорили создание того или иного изделия, помогли найти наиболее оптимальное решение. Однако список математиков, удостоенных за участие в атомном проекте высокого звания Героя Социалистического Труда, позволяет судить о важности полученных результатов. Награды были удостоены академики М.В. Келдыш, А.Н. Тихонов, Н.Н. Боголюбов, Д.С. Блохинцев, С.Л. Соболев, А.А. Самарский, Г.И. Марчук, А.А. Дородницын, В.С. Владимиров, Д.Е. Охоцимский, Н.Н. Яненко.

Помимо решения конкретных задач укрепления обороноспособности страны, благодаря этим масштабным работам в кратчайшие сроки (5–7 лет) удалось создать базу современной прикладной математики и программирования как основы информационных технологий, до этого не существовавших. Следует отметить, что большинство результатов в силу закрытого характера исследований, получены учёными СССР и США независимо друг от друга. В те годы был заложен фундамент методологии математического моделирования, позволяющего получать предсказательные результаты для сложных технических систем. При этом сама модель, используемая для достижения конкретных результатов с применением доступных вычислительных средств, уточняется в процессе расчётов путём сопоставления данных вычислительного и натурального экспериментов, а также теоретических рассуждений [1].

Ещё одним результатом стало создание мощных коллективов специалистов в области прикладной математики и программирования, способных решать важные народно-хозяйственные задачи. В первую очередь, это относится к специалистам РЯЦ–ВНИИЭФ, РЯЦ–ВНИИТФ, а

также институтов, находящихся под научно-методическим руководством Академии наук. В частности, в настоящее время во РЯЦ–ВНИИЭФ создан и продолжает совершенствоваться пакет прикладных программ “Логос” для нужд машиностроения, авиационной промышленности, добычи углеводородного сырья и других промышленных секторов. “Логос” составляет успешную конкуренцию аналогичному зарубежному программному продукту, ранее доминировавшему на отечественном рынке.

Одна из фундаментальных научных и технологических проблем, стоящих перед человечеством, — овладение термоядерной энергией. Перспективным направлением этих исследований сегодня становится лазерный термоядерный синтез (ЛТС), идею которого в 1964 г. высказали советские учёные академики Н.Г. Басов и О.Н. Крохин. Суть их идеи заключается в нагреве небольшой сферической капли смеси дейтерия и трития мощным короткодействующим лазерным импульсом. При этом нагретая до высоких температур оболочка разлетается, а внутрь капли идёт ударная волна, сжимающая вещество в центре капли. В таком высокоплотном веществе создаются благоприятные условия для запуска и поддержания термоядерной реакции в масштабах, приемлемых для промышленной реализации. Проблемы, возникающие при математическом моделировании этой задачи, характерны и для ряда других направлений атомной отрасли, поэтому рассмотрим их подробнее.

На рисунке 1 показано развитие неустойчивостей в термоядерной мишени. Они в немалой степени влияют на сферичность сжатия и саму возможность осуществления термоядерной реакции. Неустойчивости бывают разных пространственных масштабов, и для их адекватного описания необходимы подробные пространственные сетки, состоящие из миллиардов и даже триллионов (10^9 – 10^{12}) пространственных узлов. Расчёты в такой постановке требуют применения вычислительных систем сверхвысокой производительности с одновременным использованием большого количества независимых вычислителей (процессоров, ядер). К сожалению, адаптация алгоритмов к архитектуре систем с экстремативным параллелизмом сталкивается с серьёзными трудностями. Нужны логически простые и в то же время эффективные алгоритмы. Это серьёзная фундаментальная проблема современной вычислительной математики. На её решение направлены усилия учёных и специалистов ведущих мировых держав.

Для увеличения эффективности расчётов используются разные приёмы. Один из возможных — сгущение пространственных сеток в областях больших градиентов интересующих параметров.

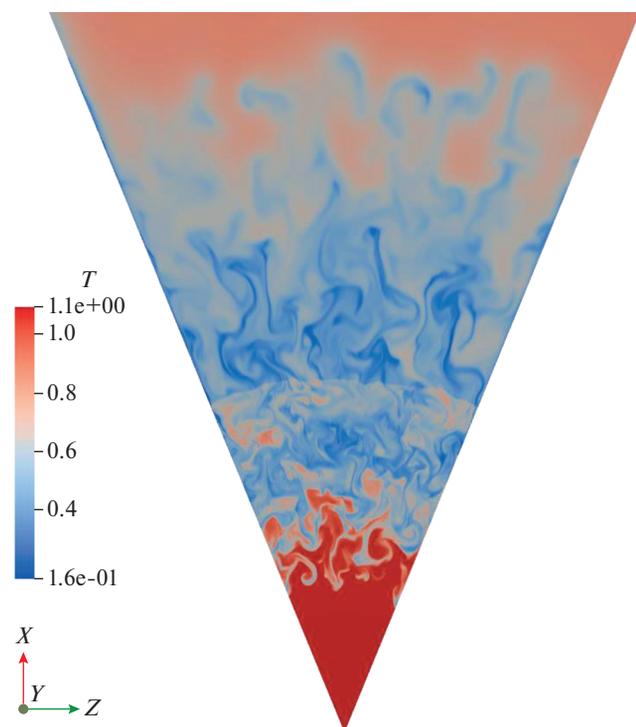


Рис. 1. Лазерный термоядерный синтез — пример моделирования в двумерной постановке, коротковолновые возмущения

На рисунке 2 отображён фрагмент полученной таким образом динамически сгущающейся сетки. Она не структурирована, поэтому перед математиками, помимо задачи создания алгоритмов, адаптируемых к архитектуре систем с массивным параллелизмом, возникает и другая трудность, характерная именно для неструктурированных сеток и связанная с необходимостью равномерной загрузки процессоров. Нужно также иметь в виду, что при построении адаптивных сеток особое внимание следует уделять соблюдению законов сохранения для основных газодинамических величин. Работы, связанные с моделированием задач ЛТС на высокопроизводительных вычислительных системах, активно ведутся коллективами ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, РФЯЦ–ВНИИЭФ, РФЯЦ–ВНИИТФ.

Перспективное направление лазерного термоядерного синтеза ассоциировано со сжатием рабочего вещества рентгеновским излучением, которое, в свою очередь, формируется при взаимодействии лазерного излучения с мишенью на основе тяжёлых металлов. Дополнительная вычислительная трудность здесь связана с чрезвычайно сложным моделированием теплового излучения. Уравнение, описывающее поле теплового излучения, помимо пространственных переменных, зависит от частоты и направления полёта фотонов. Как показывают оценки, адекватное

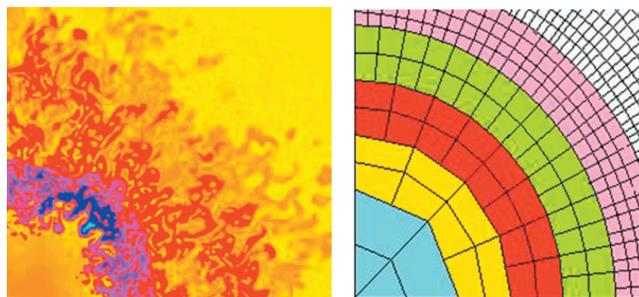


Рис. 2. Динамически адаптивная сетка

моделирование этого способа ЛТС требует применения вычислительных систем эксафлопсного класса [2, 3].

Ядерная энергетика активно использует математическое моделирование в качестве эффективного инструмента своего развития. При этом специалистам приходится решать многомерные интегро-дифференциальные уравнения переноса нейтронов с учётом сложной геометрии реактора. Кроме того, серьёзные трудности вызывает моделирование теплогидравлики реактора. В числе задач повышенной сложности — моделирование сценариев аварии на АЭС, а также распространения радиоактивных загрязнений в различных средах. Как и при моделировании ЛТС, математикам приходится сталкиваться с проблемами адаптации вычислительных алгоритмов к архитектуре систем с экстремальным параллелизмом, генерации неструктурированных сеток, к использованию динамически адаптивных сеток и других современных высокопроизводительных вычислительных технологий.

Важное направление исследований связано с изучением радиационной стойкости материалов. Основным инструментом моделирования в этой области служат методы молекулярной динамики. Для каждой частицы вещества решаются обыкновенные дифференциальные уравнения:

$$m_i \frac{d^2 \vec{r}_i}{dt^2} = F_i,$$

где m_i и r_i — соответственно масса и координата частицы i , F_i — сила, определяемая потенциалом взаимодействия частиц.

Вычислительные проблемы здесь определяются по меньшей мере двумя факторами: во-первых, большим числом (10^9 и выше) частиц, используемых при моделировании; во-вторых, необходимостью обеспечения равномерной загрузки процессоров с учётом постоянно меняющейся концентрации частиц в той или иной области пространства.

Естественно, что алгоритмы молекулярной динамики — не единственный инструмент изуче-

ния свойств материалов. В качестве другого инструмента применимы технологии искусственного интеллекта. А входными данными, используемыми нейросетями для получения информации, интересующей исследователей, наряду с разнообразными данными натуральных экспериментов, могут служить результаты математического моделирования, полученные на основе методов молекулярной динамики.

Важная составляющая вычислительных и информационных технологий — визуализация данных моделирования. Для высокопроизводительных вычислений актуальными представляются сжатие данных при построении визуализационных картин и построение изоповерхностей при аппроксимации на неструктурированных сетках. Определённые трудности возникают при визуализации процессов в заранее не фиксированной пространственно-временной локализации.

Кратко охарактеризуем и другие области применения информационных технологий. Так, решение проблемы кибербезопасности, актуальное для атомной отрасли, имеет важное значение и для других производственных отраслей, а также сфер финансов и управления. С помощью информационных технологий эффективнее выявляются “окна уязвимости”.

Проблема оценки рисков и парирования непредвиденных ситуаций приобретает для атомной отрасли особую остроту в связи с крайне негативными последствиями техногенных катастроф [4, 5]. При выяснении влияния различных причин на возможность реализации неблагоприятного сценария перспективно использование многофакторного анализа. Нельзя преуменьшать роль и машинного обучения, позволяющего получать рекомендации при возникновении критической ситуации. При этом, так же как и в исследовании свойств материалов, важную роль играет разработка на основе математического моделирования достаточно большого числа виртуальных сценариев возможных техногенных катастроф. Следует подчеркнуть, что само такое моделирование невозможно без наличия высокопроизводительных систем и соответствующих вычислительных технологий.

Ещё одно перспективное направление исследований связано с созданием “умного реактора” (как и, например, “умной домны”, “умной скважины”) и ориентировано на применение технологий искусственного интеллекта для повышения эффективности работы сложных технических устройств. Эти технологии могут применяться и при планировании строительства АЭС. Возведение такого дорогостоящего объекта

зависит от ритмичной работы многих поставщиков. Необходимо также принимать во внимание наличие будущих потребителей электроэнергии, вырабатываемой АЭС. Большой объём анализируемых данных, необходимость учёта множества факторов требуют, как и при моделировании свойств материалов и сценариев техногенных катастроф, привлечения для решения таких задач вычислительных систем высокой производительности.

В заключение отметим, что здесь указаны далеко не все сферы атомной отрасли, в которых применение компьютерных технологий даёт существенный положительный эффект. Эта отрасль была, есть и будет самым заинтересованным и взыскательным потребителем достижений в области информационных технологий, прикладной математики и математического моделирования. Как и на заре существования атомной отрасли, сегодняшние её потребности служат мощным стимулом развития этих областей науки, но реализовать этот стимул невозможно без оснащения коллективов, ведущих такие работы, современной высокопроизводительной вычислительной техникой. Необходимо поддерживать и усиливать взаимодействие между научными институтами Госкорпорации “Росатом” и институтами, находящимися под научно-методическим руководством Российской академии наук.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Chetverushkin B.N.* Problems and Prospects of Supercomputer Technologies in the Near Future // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2018. № 6. P. 448–453; *Четверушкин Б.Н.* Суперкомпьютерные технологии: проблемы и перспективы ближайшего будущего // Вестник РАН. 2018. № 12. С. 1083–1089.
2. *Ватулин В.В., Волкова К.А., Кибкало А.А. и др.* Численное исследование переноса рентгеновского излучения в вакуумной области // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Моделирование физических процессов. 2020. Вып. 2. С. 33–39.
3. *Рыкованов Г.Н., Лыков В.А., Лебедев С.Н. и др.* Численное моделирование мишеней с непрямым воздействием для термоядерного зажигания на мегаджоульных лазерных установках // 55th APS PPD, USA, Denver, 2013.
4. *Bagaev D., Grigoriev F., Kapryin I. et al.* Improving parallel efficiency of a complex hydrogeological problem simulation in GeRA // Russian Supercomputing Days. 2019. Springer, Cham. P. 265–277.
5. *Большаков Л.А., Глотов В.Ю., Головизнин В.М. и др.* Валидация кода Cabaret-SC1 на экспериментах по водородной взрывобезопасности на АЭС // Атомная энергия. 2019. № 4. С. 193–204.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

© 2021 г. Е. О. Адамов^{a,b,*}, В. Г. Асмолов^{a,**}, Л. А. Большов^{c,***}, В. К. Иванов^{a,****}

^aГосударственная корпорация по атомной энергии “Росатом”, Москва, Россия

^bНаучно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалея, Москва, Россия

^cИнститут проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

*E-mail: aeo@proryv2020.ru

**E-mail: VIGAsmolov@rosatom.ru

***E-mail: bolshov@ibrae.ac.ru

****E-mail: ivk@proryv2020.ru

Поступила в редакцию 14.01.2021 г.

После доработки 19.01.2021 г.

Принята к публикации 18.02.2021 г.

В статье, подготовленной по материалам доклада на Общем собрании членов РАН 8 декабря 2020 г., анализируются перспективы и проблемы развития современной ядерной энергетики, а также пути их решения. В конце 2018 г. президиум Научно-технического совета Госкорпорации “Росатом” одобрил Стратегию развития ядерной энергетики, предусматривающую к концу столетия выход на мощность АЭС в диапазоне 70–90 ГВт. Стратегия предполагает, что к середине века ядерная энергетика станет двухкомпонентной: наряду с технологиями существующей ядерной энергетики, пока использующей открытый ядерный топливный цикл и реакторы на тепловых нейтронах, будет выстраиваться новая ветвь ядерной энергетики на базе реакторов на быстрых нейтронах при замкнутом ядерном топливном цикле. Её развитие позволит сократить накопление отработанного ядерного топлива, снизить объёмы радиоактивных отходов, повысить эффективность использования уранового сырья, экологические показатели и сохранить конкурентоспособность ядерной энергетики по сравнению с другими генерациями.

Ключевые слова: ядерная энергетика, Стратегия развития ядерной энергетики, быстрые реакторы, двухкомпонентная ядерная энергетика, конкурентоспособность, безопасность, радиационная эквивалентность.

DOI: 10.31857/S0869587321050029

Возможность создания ядерной энергетики была подготовлена академическими работами конца XIX и первой половины XX в., в том числе отечественных учёных Г.А. Гамова, Я.Б. Зельдовича, Д.Д. Иваненко, И.В. Курчатова, К.А. Петрика, Г.Н. Флёрова, Я.И. Френкеля и Ю.Б. Харитона. Однако именно перспектива создания ядер-

ного оружия ускорила разработку ядерных реакторов. Первые реакторы в США (Chicago Pile-1, CP-1), где в 1942 г. впервые была получена управляемая цепная реакция, и его аналог Ф-1 (1946) на площадке Лаборатории № 2 АН СССР (ныне – НИЦ “Курчатовский институт”) спешно строились для проверки реализуемости ядерных реакторов и получения лабораторных количеств плутония, не существующего в природных условиях. Их опыт был использован для создания промышленных реакторов “В” в Хэнфорде (США) и “А” на комбинате “Маяк” в городе Озёрске Челябинской области, которые решали задачи наработки оружейных изотопов (Pu). Развёрнутые в рамках АН СССР в 1930–1940-х годах работы по изучению ядерного ядра, а в 1942 г. по исследованию возможности создания урановой

АДАМОВ Евгений Олегович – доктор технических наук, профессор, научный руководитель проектного направления “Прорыв” ГК “Росатом” и АО “НИКИЭТ”. АСМОЛОВ Владимир Григорьевич – доктор технических наук, профессор, советник генерального директора ГК “Росатом”. БОЛЬШОВ Леонид Александрович – академик РАН, научный руководитель ИБРАЭ РАН. ИВАНОВ Виктор Константинович – член-корреспондент РАН, главный радиоэколог проектного направления “Прорыв” ГК “Росатом”.

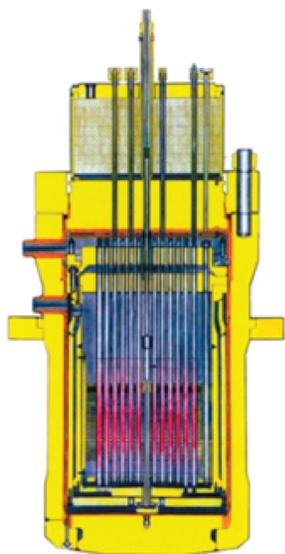


Рис. 1. Первый корпусной реактор ВМ-А

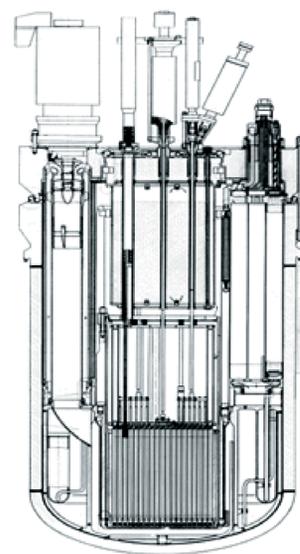


Рис. 2. Конструкция моноблочной установки МБУ-40

бомбы или уранового топлива (Постановление ГКО № 2352сс) были резко активизированы в августе 1945 г., после взрыва первых американских бомб в Хиросиме и Нагасаки, созданием Специального комитета при Государственном комитете обороны СССР. Но уже в октябре 1945 г. П.Л. Капица направляет в Первое главное управление при СНК СССР (предшественник Минсредмаша и нынешнего “Росатома”) записку “О применении внутриатомной энергии в мирных целях”. И.В. Курчатов подтвердил возможность использования конструкции созданного с целью наработки плутония реактора “А” для производства тепловой и электроэнергии. Постановление Правительства страны о строительстве в СССР первой атомной электростанции было принято в мае 1949 г., то есть за несколько месяцев до успешного испытания в Советском Союзе первого ядерного заряда.

Разработанная Н.А. Доллежалем, с использованием данных советской разведки, конструкция уран-графитового водоохлаждаемого реактора, принципиальная схема которого отличалась от американской, легла в основу одной из двух ветвей развития ядерной энергетики в СССР. Первая АЭС в Обнинске (1954), Сибирская АЭС (1958) на Сибирском химическом комбинате рядом с Томском положили начало каналному направлению реакторостроения в нашей стране, продолженному затем серией АЭС с РБМК (реактор большой мощности каналный).

Вторая ветвь ядерной энергетики – корпусные водо-водяные реакторы – появилась также благодаря оборонной тематике. Первый корпусной реактор ВМ-А (рис. 1) был спроектирован Н.А. Доллежалем для атомной подводной лодки, вошедшей

в строй в 1958 г. Развитие этого направления в рамках ВМФ сопровождалось переходом от петлевых конструкций реакторных установок к блочным со снижением их массы, габаритов и стоимости. Но настоящим прорывом стало предложение Н.А. Доллежала по конструкции моноблочной установки МБУ-40 (рис. 2), намного превосходившей перспективные решения в ядерной энергетике. Реализованные для оборонных задач реакторные установки интегрального типа стали прообразом многих разрабатываемых сегодня в мире реакторов, например, БН-1200 (рис. 3).

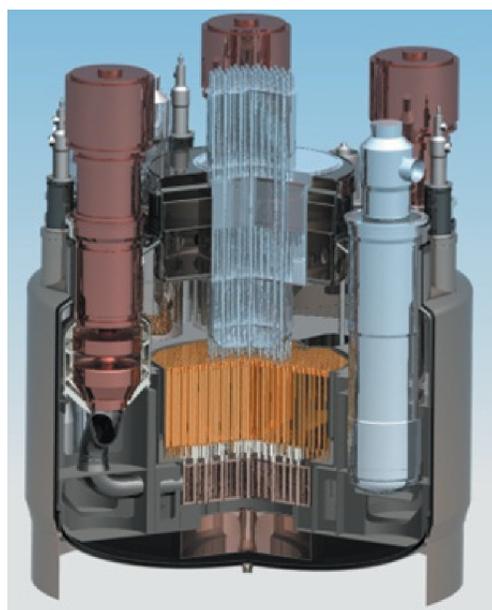


Рис. 3. Реакторная установка БН-1200



Рис. 4. Карта расположения действующих и строящихся энергоблоков АЭС России

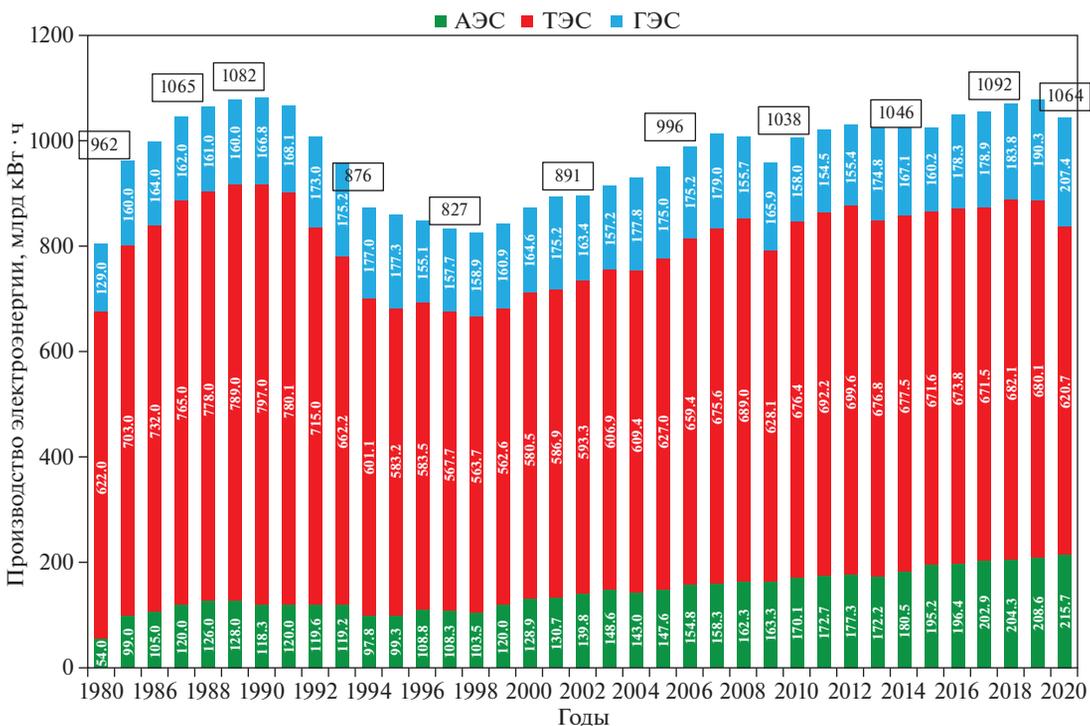


Рис. 5. Производство электроэнергии в Российской Федерации по типам электростанций (1985–2020 гг.)

Действующие и строящиеся в России энергоблоки представлены на рисунке 4. Современная ядерная энергетика РФ – это 12.0% установленной мощности генерирующих электроэнергию станций и более 20% производимой (в 2020 г.) электроэнергии. Следует обратить внимание и на динамику развития ядерной энергетики в нашей стране (рис. 5), где общее электропроизводство в течение вот уже 30 лет застыло на отметке 1000–1100 млрд кВт · ч. В 2000 г., когда этот уровень составил менее 900 млрд кВт · ч,

русская ядерная энергетика вышла на показатель 128.9 млрд кВт · ч, превысив уровень 1989 г., который долгое время оставался рекордным – 128 млрд кВт · ч. Государственная ядерная энергетика стала первой в России отраслью, восстановившей потенциал после сокрушительного падения всех показателей экономики в 1990-е годы. Для нефтяной промышленности, производства металлов и других отраслей, попавших в частные руки, на это потребовалось ещё 5–10 лет. В условиях стагнации экономики, обусловившей отсут-

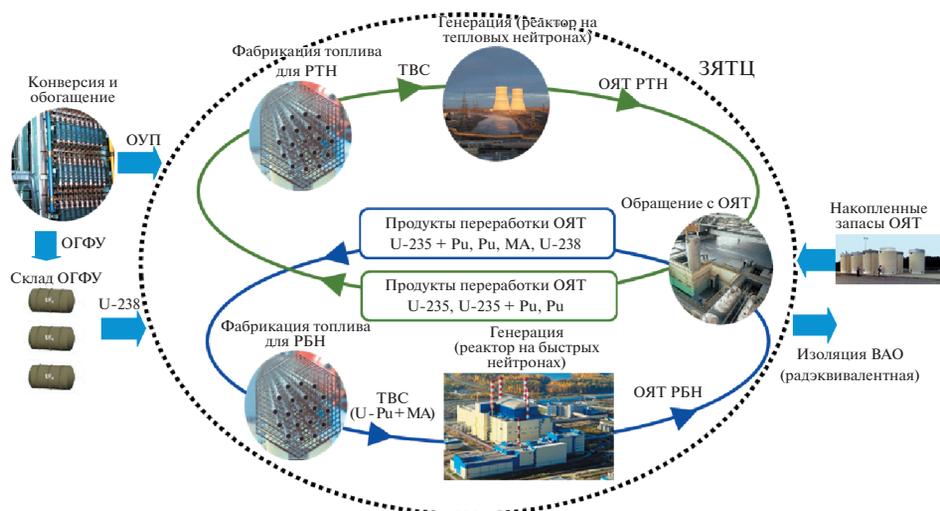


Рис. 6. Двухкомпонентная атомная энергетика (система реакторы на быстрых нейтронах и реакторы на тепловых нейтронах)

стве потребностей в развитии производства электроэнергии, ядерная энергетика увеличила в 2020 г. производство электроэнергии до 215.7 млрд кВт · ч. Электрогенерация АЭС в Европейской части страны достигает почти 40%.

Продукция отрасли – ключевая часть высокотехнологичного экспорта: 10-летний портфель зарубежных заказов Госкорпорации “Росатом” превышает 130 млрд долл., в то время как, например, аналогичный портфель по экспорту вооружения составляет примерно 50 млрд долл. Лидирующие позиции РФ достигнуты в жёсткой конкуренции с США, Францией, Японией и Канадой. В то же время на мировые рынки активно выдвигаются новые игроки из Китая, Южной Кореи, предлагающие аналогичные продукты по более низкой цене, сопровождая свои предложения дешёвыми кредитами. В этих условиях удержание мирового лидерства невозможно без развития новых технологий, решения системных проблем ядерной энергетике, к которым относятся:

- тяжёлые аварии – отказ ФРГ, Швейцарии, Бельгии и, возможно, Южной Кореи от ядерной энергетике;
- низкая эффективность использования добываемого природного уранового сырья – 0.7% (содержание ²³⁵U);
- отложенная проблема отработанного ядерного топлива (ОЯТ) – накопление и отсутствие экологически приемлемого обращения с долгоживущими высокоактивными отходами, младшими актиноидами и др.;
- риск переключения делящихся материалов, обращающихся в ядерном топливном цикле, на военные или террористические цели;
- опасность утраты конкурентоспособности.

Развитию новой технологической платформы ядерной энергетике положила начало федеральная целевая программа, принятая Правительством РФ в 2010 г., в рамках которой в 2013 г. было образовано проектное направление “Прорыв” [1]. Цель работ – выстраивание, наряду с технологиями существующей ядерной энергетике, пока использующей открытый ядерный топливный цикл и реакторы на тепловых нейтронах, новой ветви ядерной энергетике на базе реакторов на быстрых нейтронах при замкнутом ядерном топливном цикле (рис. 6). Двухкомпонентную ядерную энергетике мы рассматриваем как основную ядерную технологию в нынешнем столетии. Её развитие позволит сократить накопление отработанного ядерного топлива, снизить объёмы радиоактивных отходов, повысить эффективность использования уранового сырья, экологические показатели и сохранить конкурентоспособность ядерной энергетике по сравнению с другими генерациями [2].

Для основной из используемых сейчас технологий водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) предусматриваются два этапа развития. Первый – ВВЭР-С со спектральным регулированием и управлением за счёт изменения водно-уранового соотношения при использовании вытеснителей по ходу топливной кампании. Такие реакторы позволяют повысить коэффициент воспроизводства Pu до 0.7, снизить примерно на 30% потребление природного урана, полностью загрузить активную зону смешанным уран-плутониевым топливом, а за счёт исключения спецкорпуса, необходимого при борном регулировании, и некоторых технологических систем, снизить капитальные затраты на 10–15%. Исключение Zr как материала оболочек тепловы-

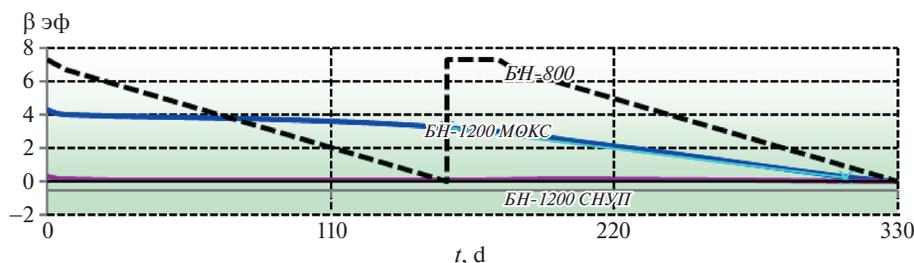


Рис. 7. Ход реактивности за кампанию в реакторной установке БН-1200 при использовании окисного (МОХ) и нитридного (СМУП) топлива

деляющих элементов снимает проблему водородных взрывов, имевших место на реакторах АЭС “Фукусима-1”.

На втором этапе – ВВЭР-СКД (реактор сверхкритического давления) – предусматривается переход к быстрому спектру нейтронов и достижение, как и у всех таких реакторов, самообеспечения топливом (КВ ~ 1 вместо 0.3–0.5). Теплотехнические параметры, в том числе КПД $\sim 46\%$ вместо 36% в АЭС-2006, выравниваются с характеристиками современной тепловой энергетики. Внедрение рассматриваемых улучшений технологии ВВЭР связано с решением проблем материаловедения.

Перспективы реакторов на быстрых нейтронах и предполагаемых их преимуществ в плане безопасности связаны с уже упоминавшимися конструкциями интегральных реакторов, в корпусе которых сосредоточены все элементы первого контура, парогенераторы и системы аварийного отвода тепла. Благодаря предложенной ещё Н.А. Доллежалем конструктивной схеме исключаются потери теплоносителя и теплоотвода от активной зоны, что детерминистически устраняет вероятность тяжёлых аварий, таких как на АЭС “Три-Майл-Айленд” (США, 1979) и “Фукусима-1” (Япония, 2011). Для исключения вероятности реактивной аварии, имевшей место на Чернобыльской АЭС в 1986 г., предлагается использовать равновесное топливо, что позволяет избежать избыточного запаса реактивности в реакторной установке, а следовательно, детерминистически исключить и такую аварию. В равновесном топливе выравнивается сжигание одних изотопов (U или Pu) и наработка плутония, что позволяет рассчитывать на прохождение любых теоретически возможных аварий без необходимости эвакуации и тем более отселения проживающего рядом со станцией населения, а также вывода из хозяйственного оборота больших земельных территорий и, следовательно, без крупного экономического ущерба [3].

Таким топливом может стать смешанное нитридное уран-плутониевое топливо (СМУП),

первенство в разработке технологии и обосновании работоспособности которого при реакторных испытаниях (до 9% выгорания тяжёлых атомов) принадлежит России. На рисунке 7 показан ход реактивности за кампанию в реакторной установке БН-1200 при использовании окисного (МОХ) и СМУП-топлива. Очевидно преимущество более плотного и теплопроводного СМУП-топлива [4].

Замыкание ядерного топливного цикла позволяет за счёт трансмутации наиболее долгоживущих изотопов реализовать так называемое радиационно-равновесное обращение с РАО, при котором через 300–500 лет, в зависимости от степени очистки от младших актиноидов, достигается радиационное равновесие добываемого уранового сырья и захораниваемых отходов. При всех обсуждаемых специалистами деталях такого подхода, очевидно, что довод о сохранении радиационного баланса Земли неизменным может оказаться решающим для общественного признания ядерной энергетики ключевой среди других “зелёных” генераций [5].

Россия выиграла соревнование с Францией в последовательном развитии линии реакторов на быстрых нейтронах (РБН): от БР-5 в 1959 г. до БН-800 в 2015 г., последовательно наращивая мощности и осваивая физику РБН и технологии натриевого теплоносителя. Благодаря этим работам РФ остаётся лидером тематики РБН в мире, которой сейчас активно занимаются Китай и Индия.

Сохраняя лучшие достижения РБН с натриевым теплоносителем и окисным топливом, Россия перехватывает лидерство у американской электротехнической компании “Westinghouse”, по проектам или лицензиям которой создана большая часть АЭС в мире. В 2015 г. “Westinghouse” объявила, что следующим поколением реакторных установок будут РБН, причём не с металлическим топливом, которое многие годы в США рассматривалось как перспективное для реакторов на быстрых нейтронах, а со СМУП-топливом, а также со свинцовым теплоносителем. За

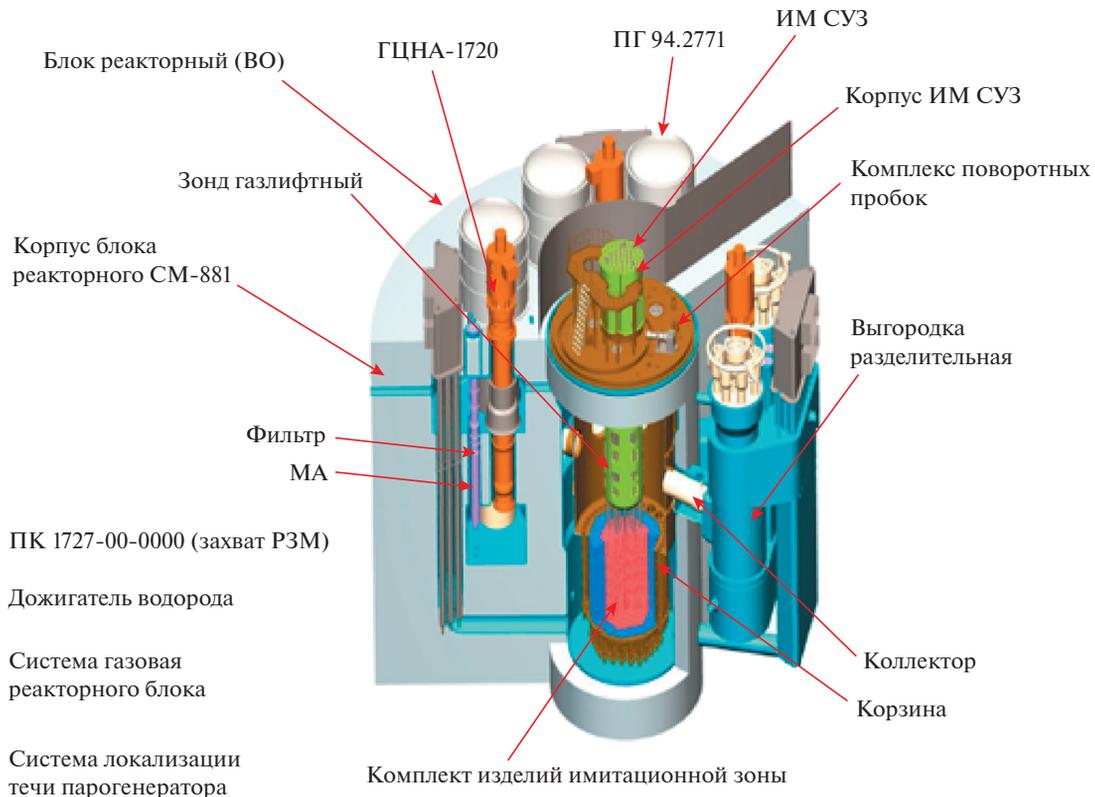


Рис. 8. Реакторная установка БРЕСТ-ОД-300

исключением металло-бетонного корпуса, на который наши конкуренты не решились, это те же конструктивные подходы, что и в отечественной разработке реакторной установки БРЕСТ (рис. 8), что позволяет говорить о перехвате первенства у американцев в развитии новой технологической платформы ядерной энергетики. Опытно-демонстрационный комплекс, включающий топливное производство, энергоблок БРЕСТ и модуль переработки ОЯТ, соответствующий подходам новой технологической платформы, сооружается на площадке Сибирского химического комбината: от первой Сибирской АЭС до перспективной АЭС с пристанционным замкнутым ядерным топливным циклом (ЗЯТЦ).

Экономика ядерной энергетики всегда отличалась высокой капиталоемкостью, однако выигрывала в стоимости производимых электричества и тепла, поскольку, в отличие от органической генерации, её топливная составляющая кратно ниже. Проектные изменения, обусловленные требованиями безопасности после тяжёлых аварий, поставили ядерную энергетику на грань конкурентоспособности. Новые проекты АЭС с тепловыми и быстрыми реакторами могут сохранить конкурентоспособность с основными пока конкурентами (парогазовыми установками) при условии, что цена денег не будет слишком высо-

кой. Так, при нулевой ставке дисконтирования, LCOE¹ АЭС любого типа отличаются высокой конкурентоспособностью (рис. 9), и она сохраняется при ставке дисконтирования около 5%. Для всех капиталоемких объектов в мире большие требования к стоимости денег не предъявляются, и понятно, что государство выигрывает, предоставляя для строительства АЭС в РФ или за рубежом деньги бюджетные или из Фонда национального благосостояния России, по сравнению с размещением их в американские или европейские государственные ценные бумаги [6].

При разработке объектов ядерной энергетики и ядерного топливного цикла активно используются методы компьютерного расчёта и моделирования. Первоначальную базу таких расчётов в основном составили программы, разрабатывавшиеся в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша АН СССР и Физико-энергетическом институте им. А.И. Лейпунского под руководством академика Г.И. Марчука, в то время как сейчас лидером таких разработок стал Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН под руководством академика РАН Л.А. Большова,

¹ LCOE (Levelised Cost of Energy) – средняя расчётная себестоимость производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции, включая все возможные инвестиции, затраты и доходы.

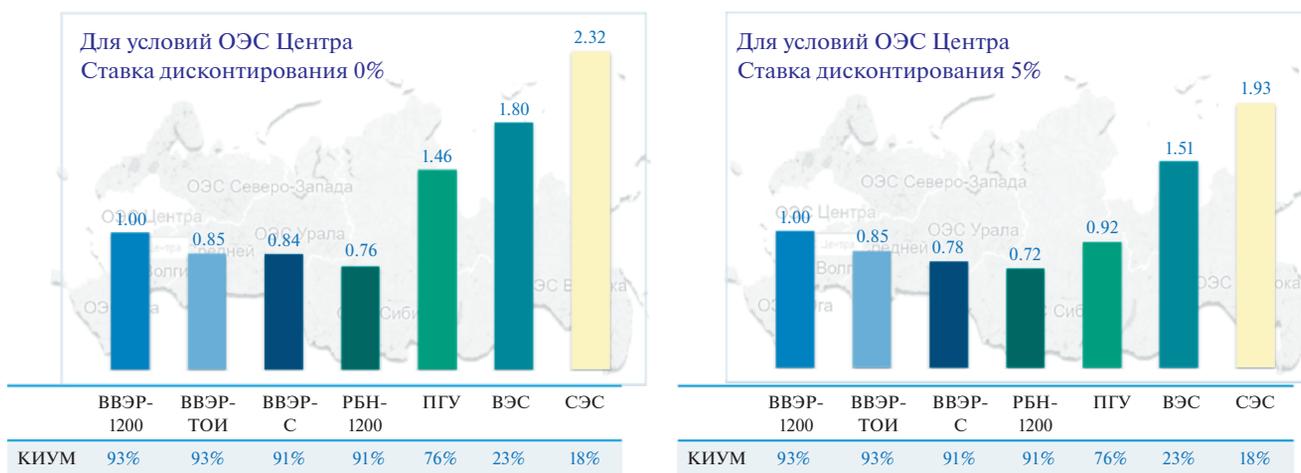


Рис. 9. Потенциал обеспечения конкурентоспособности двухкомпонентной ядерной энергетики – LCOE энерготехнологий, отн. ед.

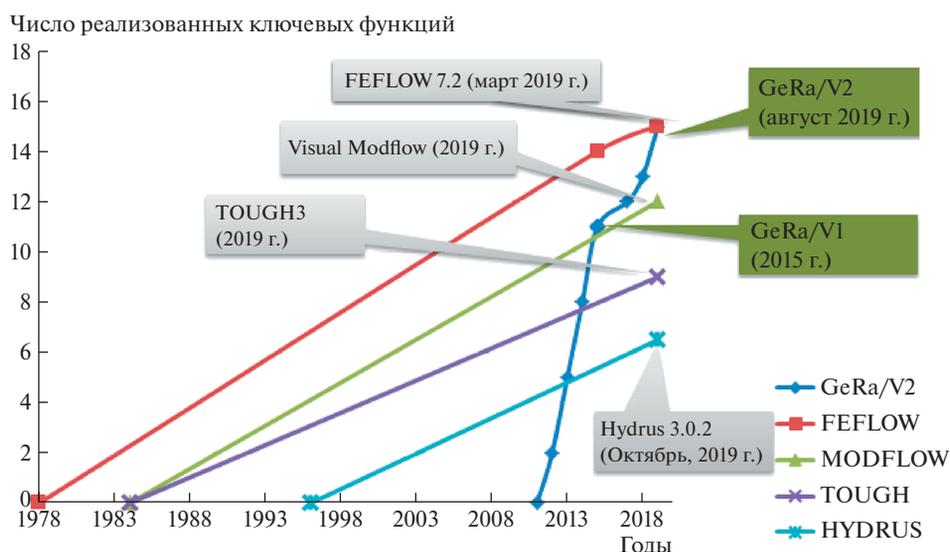


Рис. 10. Темпы разработки кода GeRa в сравнении с зарубежными аналогами

объединяющий результаты как своих специалистов, так и других институтов РАН, “Росатома” и университетов. Первоначально все программы предусматривались исключительно для реакторных установок, между тем в последние годы созданы коды для решения задач ядерного топливного цикла. Сравнение кодов (рис. 10) показывает, как большую точность отечественных разработок, так и существенно меньшее время на создание импортозамещающих кодов. Российский код “Нострадамус” продемонстрировал великолепные результаты при прогнозировании переноса в атмосфере радиоактивности от фукусимской площадки при аварии на японской АЭС в 2011 г. до Восточно-Европейской части РФ [7].

Цифровизация, о которой сейчас так много говорят, внедрялась в разработки ядерных объектов с 1950-х годов: от использования клавишных вычислительных машин до современных мощных вычислителей. Весь путь от НИОКР и до вывода объектов ядерной энергетики из эксплуатации сопровождается созданием цифровых двойников и моделированием их работы в условиях нормальных штатных режимов и отклонений от них, вплоть до постулирования тяжёлых аварий.

Уникальным достижением академической науки стало дополнение к обоснованию радиационно-эквивалентного обращения с РАО, о котором шла речь выше. Под руководством члена-корреспондента РАН В.К. Иванова показано, что онкологическое равновесие, то есть риск

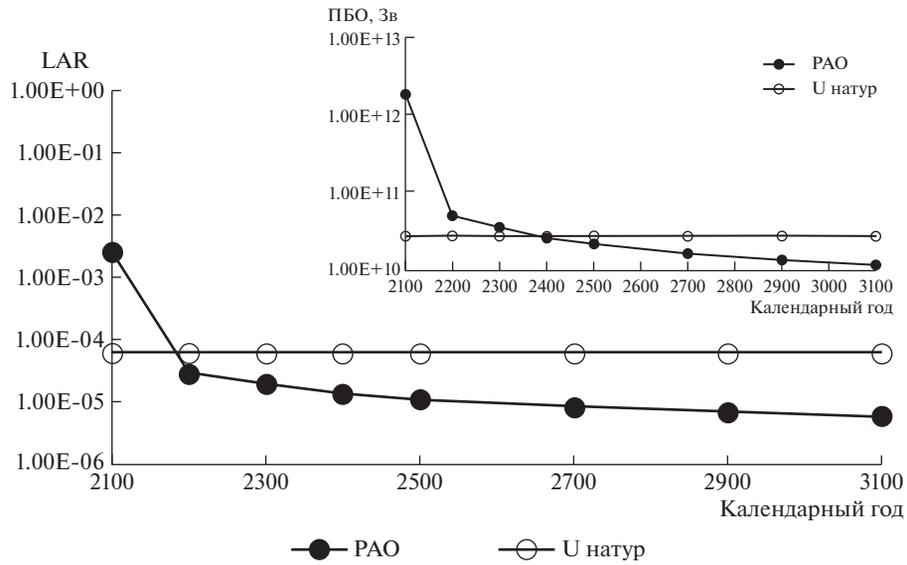


Рис. 11. Радиологическая эквивалентность по канцерогенному риску достигается через 100 лет выдержки

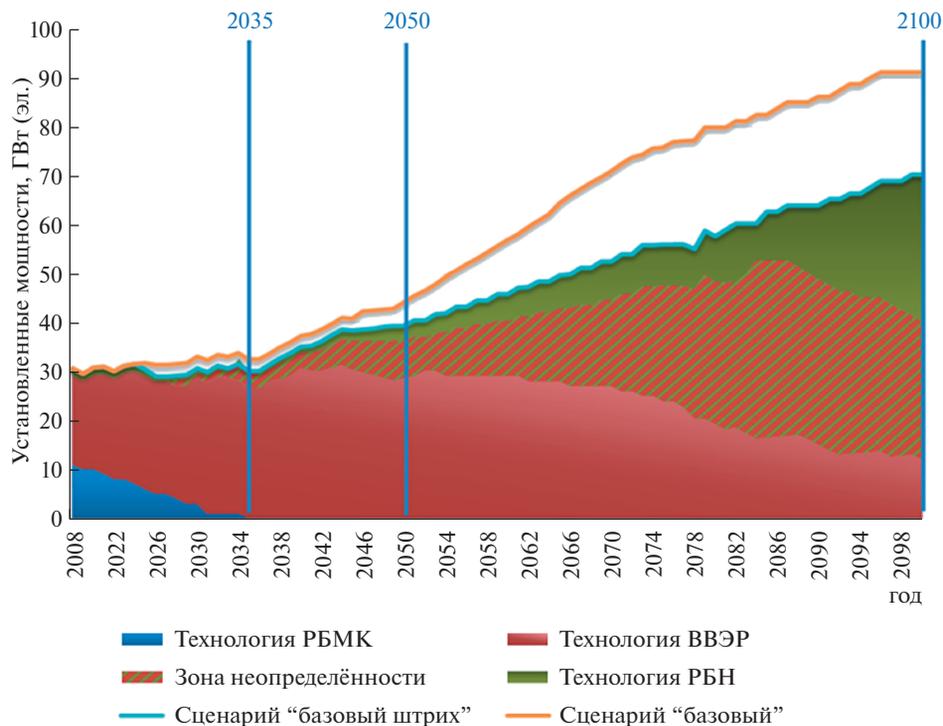


Рис. 12. Варианты сценариев развития ядерной энергетики

онкологических заболеваний от радиоактивных отходов и уранового сырья, при замкнутом ядерном топливном цикле достигается ещё быстрее, примерно через 100 лет (рис. 11) [8].

В конце 2018 г. президиум НТС Госкорпорации «Росатом» одобрил Стратегию развития ядерной энергетики, предусматривающую к концу столетия выход на мощность АЭС в диапазоне

70–90 ГВт (рис. 12). Зона неопределённости связана с тем, что не все теоремы преимущества РБН в настоящее время доказаны и, возможно, при задержке с этим, основную нагрузку придётся взять на себя реакторным установкам на тепловых нейтронах с теми усовершенствованиями, о которых речь шла выше. В любом случае уже сейчас очевидно, что ядерная энергетика, свободная от пе-

речисленных ранее проблем, может стать базовым элементом экологически чистой энергетики, основным элементом “зелёного квадрата”, другими сторонами которого являются гидроэнергетика, энергетика ветра и солнца [9].

Мы рассчитываем, что, как и в предыдущие годы, развитие ядерной энергетики будет идти в тесном взаимодействии Госкорпорации “Росатом”, РАН и НИЦ “Курчатовский институт”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Адамов Е.О.* “Proryv” project – technological base-ment for large-scale nuclear energy. IAEA International conference on “Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development” (FR17). 26–29 June 2017. Book of Abstracts. Ekaterinburg: State Atomic Energy Agency Corporation “Rosatom”, 2017.
2. *Адамов Е.О., Рачков В.И., Толстоухов Д.А., Панов С.А.* Сравнение технико-экономических показателей различных вариантов реализации ЯТЦ реакторов АЭС // Известия РАН. Энергетика. 2017. № 2. С. 3–12.
3. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / Под ред. Е.О. Адамова. М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2001.
4. *Адамов Е.О., Забудько Л.М., Матвеев В.И. и др.* Сравнительный анализ преимуществ и недостатков использования металлического и нитридного смешанного уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 2. С. 3–15.
5. *Адамов Е.О., Власкин Г.Н., Лопаткин А.В. и др.* Радиационно-эквивалентное обращение радиоактивных нуклидов в ЯТЦ – эффективная альтернатива отложенному решению проблемы накопления ОЯТ // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 6. С. 15–25.
6. *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.
7. *Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Мелихова Е.М., Панченко С.В.* Уроки Чернобыля и Фукусимы: актуальные проблемы совершенствования системы защиты населения и территорий при авариях на АЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2016. № 3. С. 36–51.
8. *Иванов В.К., Чекин С.Ю., Адамов Е.О. и др.* Атомная энергетика нового поколения: радиологическая состоятельность и экологические преимущества / Под общей редакцией В.К. Иванова, Е.О. Адамова. М.: Издательство “Перо”, 2019.
9. *Адамов Е.О., Лопаткин А.В., Муравьев Е.В. и др.* Национальная стратегия развития ядерной энергетики: два подхода к новой технологической платформе ядерной энергетики // Известия РАН. Энергетика. 2019. № 1. С. 3–14.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАМЫКАНИЯ
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

© 2021 г. Б. Ф. Мясоедов^{а,*}, С. Н. Калмыков^{б,**}, А. Ю. Шадрин^{с,***}

^а Президиум Российской академии наук, Москва, Россия

^б Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

^с Инновационно-технологический центр проекта “Прорыв” госкорпорации “Росатом”, Москва, Россия

*E-mail: bfmyas@mail.ru

**E-mail: stepan@radio.chem.msu.ru

***E-mail: ashadrin9@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.02.2021 г.

После доработки 08.03.2021 г.

Принята к публикации 11.03.2021 г.

Ядерная энергетика служит высококонцентрированным источником получения энергии, не вызывающим эмиссии парниковых газов и не влияющим на климат. В будущем она должна занять значительную долю в мировом энергетическом балансе, однако такая возможность реализуется лишь при условии решения технологических задач замыкания ядерного топливного цикла, минимизации образующихся радиоактивных отходов и мультирециклирования делящихся изотопов. Это позволит решить как экологическую, так и экономическую задачу — уход от глубинного захоронения долгоживущих радионуклидов к их трансмутации с последующим приповерхностным захоронением короткоживущих радионуклидов.

Ключевые слова: ядерный топливный цикл, минорные актиниды, пурекс-процесс.

DOI: 10.31857/S0869587321050170

Становление и этапы развития радиохимии. Днём рождения радиохимии как самостоятельной науки с полным правом можно считать 2 марта 1896 г., когда А. Беккерель на заседании Парижской академии наук доложил о своих опытах с кристаллами двойного сульфата калия и уранила [1]. Излучение, наблюдавшееся учёным в этих опытах, позднее было названо (по предложению М. Склодовской-Кюри) радиоактивным, а само

явление — радиоактивностью. В 1898 г. супруги Кюри сообщили об открытии нового радиоактивного элемента — полония [2], названного М. Склодовской-Кюри в честь страны, где она родилась и выросла, а в декабре того же года ещё одного радиоактивного элемента — радия [3]. За эти работы П. Кюри, М. Склодовская-Кюри и А. Беккерель в 1903 г. удостоились Нобелевской премии по физике. Вскоре после открытия радия



МЯСОЕДОВ Борис Фёдорович — академик РАН, советник РАН. КАЛМЫКОВ Степан Николаевич — член-корреспондент РАН, декан химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. ШАДРИН Андрей Юрьевич — доктор химических наук, научный руководитель направления “Разработка технологий замкнутого ядерного топливного цикла” АО “Прорыв”.

была обнаружена радиоактивность тория, из урановой руды выделен актиний [4], а в 1900 г. последовало открытие Э. Резерфордом эманации тория (радона-220) [5], а Э. Дорном — эманации радия (радона-222) [6]. В 1903 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди пришли к заключению, что атомы радиоактивных элементов претерпевают самопроизвольные превращения: одни элементы по цепочке распадов превращаются в другие, и это превращение сопровождается радиоактивным излучением. К концу первого десятилетия XX в. исследователям удалось выявить многие другие радиоактивные элементы, и встал вопрос об их размещении в таблице Менделеева. В 1910 г. по предложению Содди вводится термин изотоп — разновидность атомов какого-либо химического элемента с одинаковым атомным номером (которые, соответственно, располагаются в одной ячейке таблицы Менделеева), но при этом имеют разные массовые числа.

Эти открытия в значительной мере определили не только пути дальнейшего развития естествознания, но и человеческой цивилизации в целом. Одним из первых значение открытия радиоактивности оценил академик В.И. Вернадский. В своём выступлении на заседании Императорской Санкт-Петербургской Академии наук 29 декабря 1910 г. он пророчески отметил: "...теперь перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие источники сил, какие рисовались человеческому воображению" [7].

Русские учёные внесли существенный вклад в изучение радиоактивности [8]. Так, профессор Московского университета А.П. Соколов разработал метод определения радия по выделяющемуся радону, применяемый и в наше время. Г.Н. Антонову принадлежит честь открытия в 1911 г. тория-231, продукта распада в естественном радиоактивном семействе урана-235. На территории России интенсивно изучалась радиоактивность минералов, минеральных вод и грязей (И.А. Антипов, Е.С. Бурскер, А.П. Грузинцев, П.П. Орлов, А.П. Соколов, Н.А. Умов и другие). Параллельно шло изучение химии и превращений радиоактивных химических элементов. В 1897–1907 гг. П.Г. Меликов и Л.В. Писаржевский получают надурановую кислоту, С. Лордкипанидзе — фторнадурановую кислоту, Л.А. Чугаев и Н.А. Орлов — галогениды, сульфаты и оксалаты четырёхвалентного урана, А.М. Васильев синтезирует гидрат нитрата уранила.

Безусловно, самая большая заслуга в развёртывании комплексных исследований радиоактивности в России принадлежит академику В.И. Вернадскому. Его усилиями в 1915 г. организуется Радиологическая лаборатория при Академии наук, а в 1922 г. создаётся Радиевый институт, в котором Вернадский становится первым

директором, а его заместителем и руководителем химического отдела — В.Г. Хлопин, основоположник отечественной радиохимии, создатель основных технологических процессов извлечения радия из природных руд. Под руководством Хлопина организуется технологический процесс переработки радиоактивных руд, и уже к 1 декабря 1921 г. удаётся получить первые отечественные препараты радия.

Новый этап в развитии радиохимии был обусловлен открытием искусственной радиоактивности (И. и Ф. Жолио-Кюри, 1934 г.). Ему предшествовало открытие нейтрона (Дж. Чедвик, 1932 г.), благодаря чему в руках экспериментаторов появился новый инструмент: теперь они могли проводить многочисленные опыты по облучению нейтронами различных веществ, в том числе урана с целью получения новых трансурановых элементов (Э. Ферми). Однако результаты экспериментов по облучению урана нейтронами на тот момент объяснить не удалось, лишь в 1938 г. О. Ган и Ф. Штрассман открыли процесс деления ядер, а О. Фриш и Л. Мейтнер дали его физическое объяснение. Фактически с этого открытия начался новый этап в развитии "ядерных" наук, связанный с созданием ядерного оружия.

В 1940 г. путём облучения урана нейтронами был получен нептуний — первый трансурановый элемент, а в 1941 г. облучением урана дейтронами на циклотроне — ^{238}Np , который путём бета-минус распада превращался в плутоний-238. В этот период радиохимики решались важнейшие задачи, связанные с изучением химических свойств искусственно полученных элементов, созданием технологических методов переработки облучённого урана, глубокой очистки делящихся изотопов.

Значительным результатом в изучении химических свойств актинидов стало открытие Н.Н. Кротом семивалентного состояния у плутония и нептуния [9], разработка методов стабилизации четырёхвалентного состояния окисления у америция [10] и выявление возможности существования некоторых из трансурановых элементов в более низких состояниях окисления, чем трёхвалентное [11].

В исследовании окислительно-восстановительных реакций актинидов отечественная радиохимия занимает ведущее место в мире. Большой вклад в изучение таких реакций с участием ионов урана, нептуния, плутония, а также некоторых продуктов деления (технеций, родий, рутений, палладий) в различных водных растворах внёс В.С. Колтунов. Им совместно с учениками выяснен механизм более 70 окислительно-восстановительных реакций, в частности, восстановления ионов плутония и нептуния железом(II), ураном(IV), ванадием(IV), пероксидом

водорода, гидразином, гидроксиламином, аскорбиновой, сернистой и азотистой кислотами, окисления урана(IV), ионов нептуния и плутония железом(III), ванадием(V), ионами марганца, азотной и азотистыми кислотами, реакции диспропорционирования ионов плутония(V) и нептуния(V) [12]. Сформировалось новое направление – исследование редокс-реакций нептуния и плутония в растворах три-*n*-бутилфосфата. Полученные результаты нашли применение в пурекс-процессе (от англ. Plutonium Uranium Extraction) – технологическом способе выделения урана и плутония из облучённого в реакторе урана [13]. Процесс основан на жидкостной экстракции урана(VI) и плутония(IV) из водных растворов три-*n*-бутилфосфатом в алифатических растворителях. Отделение плутония от урана достигается восстановлением плутония(IV) (обычно с помощью U(IV), Fe(III) или электрохимически) до плутония(III), который не экстрагируется раствором три-*n*-бутилфосфата. Пурекс-процесс остаётся в мире основным способом переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Создание отечественной атомной промышленности началось в середине 1940-х годов под руководством И.В. Курчатова. Перед радиохимиками страны были поставлены две основные задачи: разработка гидрометаллургической технологии выделения, концентрирования и аффинажа урана, извлекаемого из отечественных руд, и технологии выделения из облучённого урана плутония-239 для создания атомного оружия. Решение первой из этих задач в 1950 г. поручили Всесоюзному научно-исследовательскому институту химической технологии (ВНИИХТ).

Плутоний вначале пытались получать с использованием осадительного метода, разработанного учёными Радиевского института АН СССР под руководством академика В.Г. Хлопина. Для проверки технологических параметров метода и наработки весовых количеств плутония во Всесоюзном научно-исследовательском институте неорганических материалов (ВНИИНМ) была создана полупромышленная установка У-5, на которой из облучённого урана в середине 1945 г. был выделен первый в СССР и Европе концентрат плутония, а в конце 1948 г. получены весовые количества (300 мг) плутония нужного качества. Необходимо отметить, что на У-5 работали, проходили стажировку и учёбу многие радиохимики различных научно-исследовательских институтов и комбината № 817. В 1949 г. в г. Озёрске (Челябинск-40) на этом комбинате, впоследствии преобразованном в ПО “Маяк”, был запущен первый радиохимический завод, функционировавший на основе осадительной технологии.

С середины 1950-х годов при тесном сотрудничестве специалистов ВНИИНМ, ВНИИХТ, Ра-

диевого института и ПО “Маяк” разрабатывался экстракционный метод переработки облучённых урановых блоков с использованием три-*n*-бутилфосфата и новых сорбентов. Результатом стала оригинальная экстракционно-сорбционная технология, успешно внедрённая на комбинате “Маяк” в 1976 г.

Проблема обеспечения надёжным аналитическим контролем новых технологий производства сверхчистого урана и плутония решалась под руководством ближайшего сподвижника И.В. Курчатова академика А.П. Виноградова. Радиохимики-аналитики Института геохимии и аналитической химии (ГЕОХИ) АН СССР, ВНИИНМ, ПО “Маяк” и Радиевского института изучали химические свойства малоизвестных тогда нептуния и плутония, разрабатывали эффективные методы их выделения и глубокой очистки от осколочных элементов. Создавались высокочувствительные методы определения нептуния и плутония в растворах сложного состава: радиометрические, спектральные, электрохимические, люминесцентные и другие. Не меньшее внимание уделялось проблеме контроля за содержанием микропримесей в металлическом уране на уровне, не превышающем 10^{-5} – 10^{-4} %. С этой целью повышалась чувствительность прямых (главным образом спектральных и электрохимических) методов определения примесей, одновременно шёл поиск экстракционных сорбционных методов концентрирования. Результаты работ были обобщены А.П. Виноградовым в докладе “Физико-химические методы контроля производства урана” на первой Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в 1955 г. в Женеве [14, с. 72–89].

Технологические и инженерные решения, которые использовались в оружейных проектах СССР и США, практически одновременно находили применение в мирном атоме, то есть в ядерной энергетике. Промышленное освоение ядерной энергии началось с момента пуска в 1954 г. в СССР первой атомной электростанции мощностью 5 МВт. В 2019 г. в 34 странах мира насчитывалось 449 действующих ядерных энергетических реакторов, по данным на середину 2019 г. 54 реактора строились [15]. Согласно прогнозам МАГАТЭ, к 2030 г. рост в секторе ядерной энергетики составит от 17% по пессимистическому сценарию до 94% по оптимистическому. В России действуют 11 АЭС (38 энергоблоков) общей мощностью около 31 ГВт, они производят около 13% всей электроэнергии в стране.

Проблема обращения с радиоактивными отходами (РАО), образующимися на всех стадиях ядерного топливного цикла (ЯТЦ), – один из факторов, негативно влияющих на дальнейшее развитие ядерной энергетики. Существуют две

принципиально различающихся стратегии – открытый и замкнутый ЯТЦ.

Согласно первой из них (она принята в США, Швеции, Финляндии, Швейцарии), отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) не перерабатывают, а складывают в специальных хранилищах с возможностью переработки или окончательного геологического захоронения в будущем. В мире накоплено уже более 200 тыс. тонн отработавшего ядерного топлива, и хотя в настоящее время на планете нет ни одного лицензированного глубинного геологического хранилища ОЯТ, оно хранится до принятия окончательного решения о его судьбе, при этом объём ОЯТ ежегодно увеличивается примерно на 8–10 тыс. тонн [16].

В ряде стран с развитой ядерной энергетикой (Франция, Великобритания, Япония, Россия) ОЯТ подвергают переработке с экстракционным выделением урана и плутония в пурекс-процессе и последующим отверждением жидких РАО (опытные заводы с такой технологией имеются в Китае и Индии). Глубинное геологическое захоронение РАО в отверждённом виде осуществляется на заключительной стадии замкнутого ядерного топливного цикла. Высокорадиоактивные отходы (ВАО) после переработки ОЯТ, как правило, представляют собой растворы и пульпы, содержащие продукты деления – радионуклиды Cs, Sr, Zr, Tc, Mo, Ru, I, редкоземельных элементов, а также продукты активации и коррозии (радионуклиды Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zr), минорные актиниды (Np, Am, Cm) и остаточные количества U и Pu.

Как и в случае ОЯТ, в мире нет ни одного лицензированного глубинного хранилища ВАО отходов. Причина – необходимость обоснования безопасности таких хранилищ на период до 1 млн лет. Расчётные данные об уменьшении потенциального долгосрочного воздействия на окружающую среду при захоронении, с одной стороны, ОЯТ, с другой стороны, РАО, образующихся в ходе замкнутого ядерного топливного цикла с выделением делящихся актинидов (^{239}Pu и ^{235}U) для повторного использования в ядерной энергетике и минорных актинидов (^{237}Np , ^{241}Am , ^{244}Cm) с целью их трансмутации в реакторах на быстрых нейтронах, приведены на рисунке 1 [17]. Так, радиотоксичность РАО во времени, после выделения из ОЯТ долгоживущих актинидов, уменьшается на много порядков по сравнению с радиотоксичностью исходного ОЯТ. Таким образом, замыкание ЯТЦ с мультирециклированием делящихся компонентов, фракционированием радиоактивных отходов для выделения наиболее экологически опасных долгоживущих изотопов (таких, как америций-241, 243) для последующей их трансмутации и существенное уменьшение объёма РАО – стратегическая научно-технологиче-

ская задача, стоящая перед атомной отраслью страны.

Стратегия замыкания ядерного топливного цикла в двухкомпонентной ядерной энергетической системе с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах предполагает рециклирование делящихся материалов, минимизацию или полный отказ от глубинного захоронения ВАО путём выделения актинид-лантанидной фракции с последующим разделением америция и кюрия для трансмутации америция и хранения кюрия до распада, фракционирование РАО с целью выделения короткоживущей фракции (Cs, Sr), металлов платиновой группы, а также технеция и других элементов, минимизацию объёмов РАО. Таким образом, реализация данной концепции [18–21] позволит:

- решить отложенные проблемы обращения с ОЯТ и РАО, последовательно сократить объёмы накопленного ОЯТ и предотвратить дальнейшее его накопление;
- вовлечь в ЯТЦ плутоний как продукт переработки ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах (ВВЭР) для изготовления топлива для реакторов на быстрых нейтронах и полного использования энергетического потенциала природного урана (^{238}U) путём многократного рецикла топливных материалов;
- фракционировать радиоактивные отходы, извлекать долгоживущие минорные актиниды для дожига или трансмутации в ядерных реакторах, что, в совокупности с многократным рециклом плутония, позволит значительно снизить экологическую опасность РАО;
- технологически поддерживать режим нераспространения делящихся материалов за счёт поэтапного исключения обращения обогащённого урана и выделения чистого плутония.

Одним из существенных оснований для перехода к замкнутому ЯТЦ с использованием “быстрых” реакторов служит успешная и не имеющая зарубежных аналогов эксплуатация промышленного “быстрого” реактора БН-600 на Белоярской АЭС. В 2016 г введён в эксплуатацию 4-й энергоблок с БН-800, изначально ориентированный на отработку технологий замыкания ЯТЦ [18, 22, 23].

Современная инфраструктура замкнутого топливного цикла в нашей стране представлена несколькими предприятиями. С 1977 г. действует завод РТ-1 ПО “Маяк”. Модернизация РТ-1 позволит эксплуатировать его до 2035 г. с возможностью продления этого срока. Завод может перерабатывать в год до 400 т отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000, БН-600, РБМК-1000, транспортных и исследовательских реакторов. За время эксплуатации на заводе РТ-1 переработано более 6000 т ОЯТ. Переработка ОЯТ реакторов на быстрых

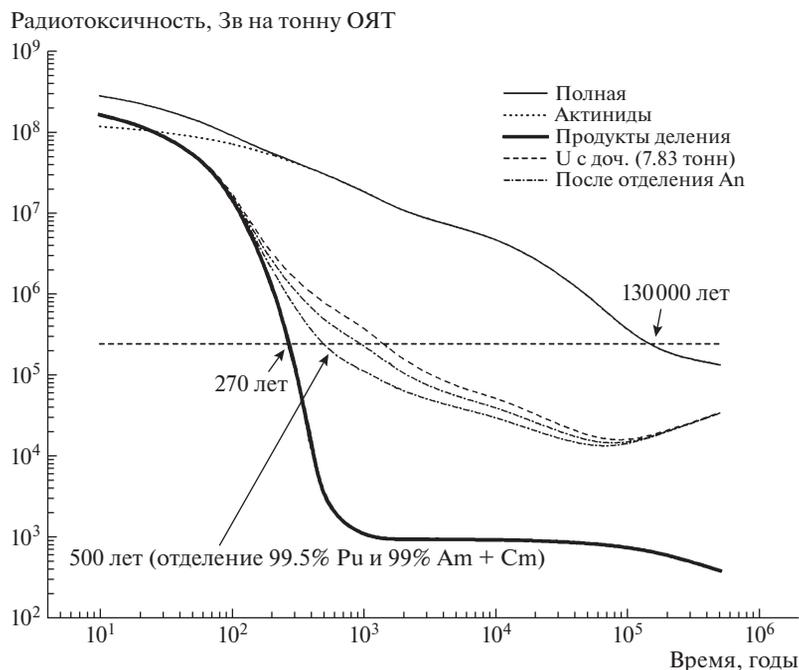


Рис. 1. Изменение радиотоксичности радиоактивных отходов во времени
 Источник: [17].

нейтронах БН-800 пока не проводилась. В 2012 и 2014 г. на заводе успешно переработано 8 тепловыделяющих сборок со смешанным оксидным уран-плутониевым (МОКС) отработавшим топливом БН-600 с выгоранием 73–89 ГВт · сут/т и выдержкой около 20 лет. Существенных потерь плутония в отходы при этом не зафиксировано, содержание плутония в рафинате составило менее 0.1 мг/л, а в нерастворимых остатках плутоний не обнаружен [20, 24].

На Горно-химическом комбинате ГК «Росатом» введены в эксплуатацию завод по производству смешанного оксидного уран-плутониевого (МОКС) топлива для БН-800 и первая очередь (исследовательские горячие камеры) Опытно-демонстрационного центра по переработке ОЯТ ВВЭР-1000. Вторую очередь этого центра, с получением исходных оксидов, пригодных для изготовления МОКС и/или топлива на основе неразделённой и необогащённой смеси регенерированных урана и плутония, допированного обогащённым ураном, планируется ввести в эксплуатацию в 2021 г. [18, 19].

Развитием технологий Опытно-демонстрационного центра может стать экстракционный пурекс-процесс (рис. 2). Он предполагает использование трибутилфосфата как экстрагента; выделение и рециклирование урана, плутония, нептуния; фабрикации топлива из регенерированных делящихся материалов; выделение актинид-лантанидной фракции из рафината с после-

дующим извлечением америция экстракционным или осадительным методом для его дожигания; обращение с РАО 1 класса, содержащими цезий, стронций и другие продукты деления; контролируемое хранение кондиционированных РАО с кюрием и лантанидами до распада с последующей переработкой для извлечения плутония, накопленного при распаде.

На Сибирском химическом комбинате ГК «Росатом» создаётся Опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК) в составе энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300 и замыкающего ядерный топливный цикл пристанционного производства, который включает в себя модули переработки облучённого смешанного нитридного уран-плутониевого топлива (СНУП) и фабрикация/рефабрикация для изготовления стартовых твэлов из привозных материалов и твэлов из рециклированных материалов. В настоящее время завершается сооружение модуля фабрикация/рефабрикация ОДЭК для производства СНУП топлива, который планируется ввести в эксплуатацию в 2022 г. В 2024 г. предполагается начать сооружение модуля переработки ОЯТ. На первом из этих модулей будет реализована технология карботермического синтеза, на втором планируется реализовать технологию комбинированной пирохимической и гидрометаллургической переработки СНУП ОЯТ топлива, которая пригодна и для переработки МОКС ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах [23]. Для переработки

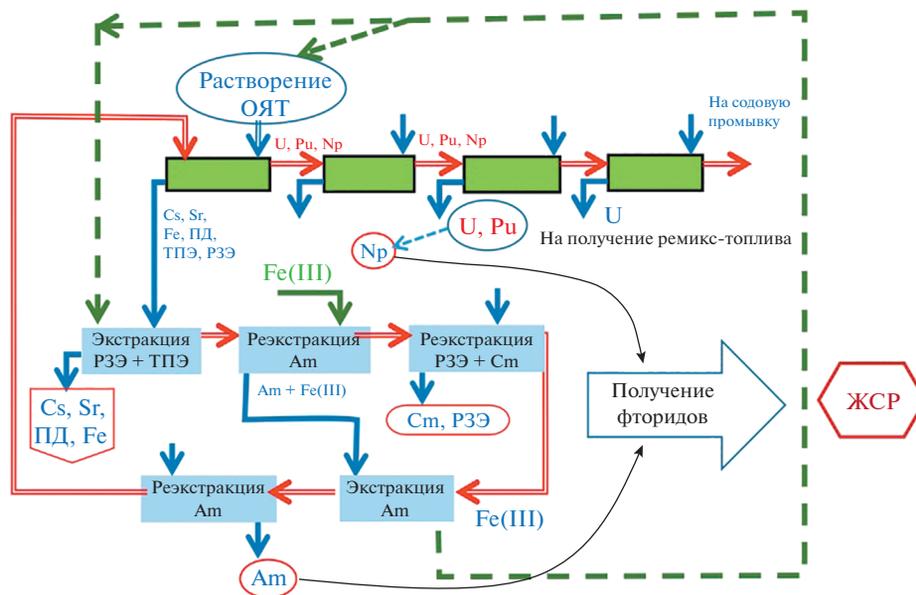


Рис. 2. Принципиальная схема экстракционного “железного” пурекс-процесса
РЗЭ – редкоземельные элементы; ТПЭ – трансплутониевые элементы; ЖСР – жидкосолевого ядерный реактор

СНУП и МОКС ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах с малым временем выдержки разработана комбинированная технология [25], предполагающая совместное выделение урана и плутония, а также её чисто гидрометаллургический вариант. Оба варианта предусматривают выделение и разделение америция и кюрия, получение в качестве целевого продукта смеси оксидов урана, плутония и нептуния, смесей оксидов урана и америция, оксидов урана и кюрия. Как вариант, возможно получение смешанных оксидов урана, плутония, нептуния и америция. Пирохимический передел комбинированной технологии – сегодня в стадии разработки, исследования по гидрометаллургическому переделу комбинированной технологии (рис. 3) – на заключительной стадии.

В качестве резервного варианта завершается разработка и чисто гидрометаллургической технологии переработки ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах. ОДЭК впервые в мире должен продемонстрировать устойчивую работу полного комплекса объектов, обеспечивающих замыкание ЯТЦ. Пристанционный вариант организации топливного цикла позволяет отработать технологии замкнутого ЯТЦ с малым временем внешнего топливного цикла в минимальные сроки в пределах одной площадки. С середины 2030-х годов ожидается внедрение конкурентоспособных реакторов на быстрых нейтронах, переход к двухкомпонентной структуре атомной энергетики и замкнутому ЯТЦ (см. рис. 3).

Замыкание ЯТЦ ставит задачу многократного рециклирования плутония, а значит, и освоения новых технологий производства смешанного уран-плутониевого топлива. Широкие возможности открывает использование СВЧ-излучения для приготовления порошка диоксида урана [26] как основы ядерного топлива из его азотнокислых растворов и соединений урана (триоксид, пероксид, U_3O_8 и др.), в том числе в присутствии органических восстановителей (карбогидразид, ацетгидроксамовая и аминокусусная кислоты), а также в восстановительной, инертной атмосфере и на воздухе. Результаты исследования гранулометрического состава, морфологии частиц, физико-химических и технологических свойств полученных образцов, определение насыпной плотности, удельной поверхности и массовой доли влаги показывают, что полученные порошки диоксида урана соответствуют нормативным требованиям. При спекании таблеток из спрессованного диоксида урана под действием СВЧ-излучения мощностью 2.1 кВт при 1650°C в течение 2 часов были приготовлены керамические топливные таблетки с плотностью около 10.40 г/см³ и открытой пористостью около 0.25 объёмного %, что также соответствует требованиям.

Разработан метод получения порошков твёрдых растворов диоксидов урана и церия (имитатор америция) с содержанием последнего 3 и 10 масс. %, базирующийся на восстановительной термохимической денитрации их азотнокислых растворов с использованием СВЧ-излучения [27]. Показано, что Се(IV) образует твёрдый раствор

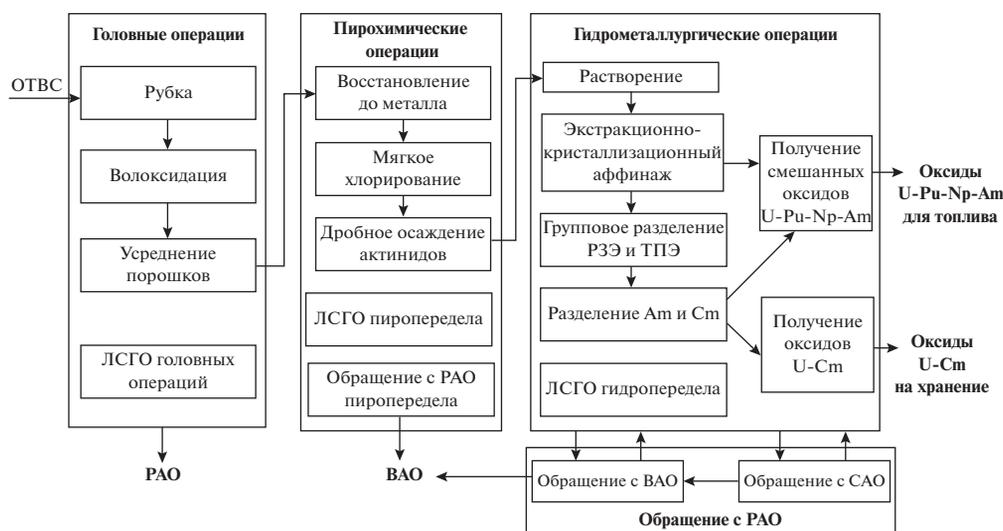


Рис. 3. Принципиальная технологическая схема комбинированной технологии переработки смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) и смешанного оксидного уран-плутониевого (МОКС) отработавшего ядерного топлива (РН-процесс)

ОТВС – отработавшая тепловыделяющая сборка; ЛСГО – локальная система газоочистки; РАО – радиоактивные отходы

его диоксида в матрице UO_2 со структурой флюорита. Полученные порошки состоят из частиц (гранул), образующих фракции размерностью не более 400 мкм, и долей частиц размерностью менее 25 мкм не более 1 масс. %. Их насыпная плотность и насыпной вес с утряской – 1.8–2.5 г/см³, а полная удельная поверхность не менее 2 м²/г. В связи с планируемым вариантом дожигания америция в реакторе БРЕСТ-ОД-300 способ может быть рекомендован к использованию в качестве основного для получения смешанных оксидов урана и америция на модуле переработки ОЯТ опытно-демонстрационного энергокомплеса Сибирского химического комбината.

Методы разделения Am(III) и Cm(III). Важнейшая научно-технологическая задача, требующая решения при реализации замкнутого ЯТЦ и минимизации глубинного захоронения долгоживущих РАО, – групповое выделение изотопов редкоземельных элементов и минорных актинидов (америция и кюрия), а также их разделение между собой. Сложность задачи определяется близостью химических свойств этих элементов.

Вне зависимости от стратегии реализации замыкания ЯТЦ – на основе пурекс-процесса или комбинированной пирохимической и гидрометаллургической технологии, в азотнокислых рафинатах, представляющих собой основную массу высокоактивных радиоактивных отходов, остаются продукты деления, а также изотопы трансурановых элементов (минорные актиниды) – нептуний, америций и кюрий. Содержание минорных актинидов по массе не превышает 0.1% от

ВАО, но именно они (прежде всего америций) при дальнейшем геологическом захоронении представляют наибольшую опасность, поскольку являются долгоживущими и обладают большим тепловыделением. Поэтому замкнутый ЯТЦ должен включать в качестве обязательной стадию разделения исключительно близких по химическим свойствам лантанидов и актинидов, а также разделения америция и кюрия. Выделенный из ВАО америций далее возможно подвергнуть трансмутации в реакторах на быстрых нейтронах. Кюрий – исходный нуклид для производства калифорния-252, который используется в нейтронных источниках в ядерной медицине, фундаментальных исследованиях и в атомной промышленности.

На сегодня общепринята технология разделения актинидов и лантанидов на основе противоточной экстракции в двухфазной системе “водный раствор/органический растворитель” с использованием селективных органических лигандов. Для эффективного выделения минорных актинидов с целью дожигания и снижения радиоэкологической опасности захораниваемых ВАО разработаны технологии группового разделения трансурановых и трансплутониевых элементов с использованием экстракционной системы N,N,N',N'-тетраоктилдигликольамид (TODGA) – метанитробензотрифторид (Ф-3) (рис. 4). В 2017–2018 гг. на ПО “Маяк” проведены первые “горячие” динамические испытания экстракционной технологии выделения америция и кюрия из реальных ВАО – рафинатов от переработки отработавшего ядерного топлива реакторов БН-600 и ВВЭР-440.

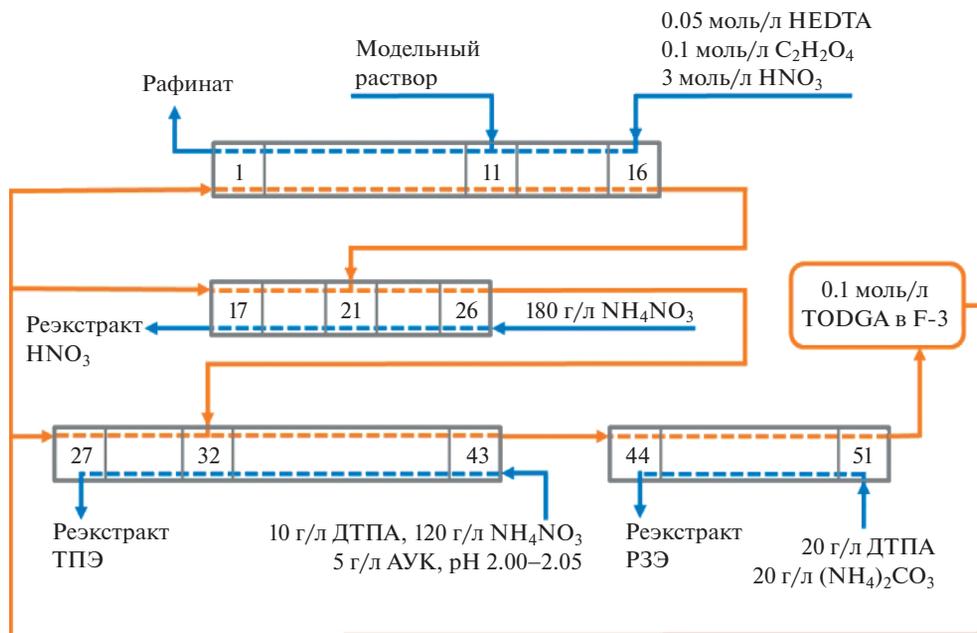


Рис. 4. Принципиальная технологическая схема выделения концентрата трансплутониевых элементов в экстракционной системе TODGA – Ф-3

В результате достигнуто извлечение 99.9% америция [25].

Для разделения америция и кюрия при фракционировании ВАО специалистами ВНИИНМ и МГУ им. М.В. Ломоносова предложена новая экстракционная система на основе несимметричных дигликольамидов (C8-C12 N,N-диоктил-N',N'-дидодецилдигликольамид и C10-C12 N,N-дидецил-N',N'-дидодецилдигликольамид) с непожароопасными разбавителями, не содержащими фтора или хлора.

В ходе исследования экстракционных свойств полученных лигандов было показано, что стехиометрическое количество азотной кислоты экстрагируется во всех системах при равновесном содержании азотной кислоты 3 моль/л. Тип растворителя (тридекан или “Изопар-М”) не оказывает влияния на экстракционные характеристики. Для всех экстракционных систем показана фазовая устойчивость до 50 г/л по неодиму в водной фазе. Образование третьих фаз наблюдается при контакте органических растворов с растворами имитантами ВАО, содержащими палладий(II) и цирконий(VI) свыше 0.6 г/л и 0.7 г/л (для органических фаз на основе C8-C12). Образование третьих фаз при больших содержаниях указанных элементов может быть подавлено за счёт введения водорастворимых комплексонов или октанола-1 в органическую фазу. С ростом температуры от 10 до 50°C коэффициенты распределения падают в 10 раз. Промывка от продуктов деления – палладия(II) и циркония(IV) может быть осу-

ществлена за счёт введения комплексона HEDTA и щавелевой кислоты, соответственно.

Количественная реэкстракция америция и кюрия может быть произведена раствором диэтилентриаминпентауксусной кислоты 10 г/л при pH 2 в присутствии 0.5 моль/л нитрата натрия.

ВНИИНМ и Институт физической химии и электрохимии (ИФХЭ) им. А.Н. Фрумкина РАН ведут совместные разработки сорбционно-хроматографической технологии разделения Am и Cm. В результате разработана математическая модель процесса разделения, предложены варианты обращения с отработанным сорбентом.

В 2015 г. на опытно-промышленной установке ПО “Маяк” при участии ИФХЭ РАН проведены пилотные испытания сорбционно-хроматографической технологии разделения америция и кюрия с использованием сульфокатионита. В качестве исходного раствора использовался концентрат редкоземельных и трансплутониевых элементов, полученный из рафината экстракционной переработки ОЯТ ВВЭР-440. Во время испытаний давление в системе не превышало 3 атм. В результате аффинажного процесса было выделено около 9 г чистого Cm и примерно 65 г чистого Am (56% от исходного) с содержанием кюрия менее 0.8% по массе и $^{154,155}\text{Eu}$ – менее 0.1% по активности.

На базе ВНИИНМ с использованием концентрата редкоземельных и трансплутониевых элементов, полученного в результате переработки ОЯТ ВВЭР-440, проведена проверка разделения Am и Cm методом высокоэффективной жидкост-

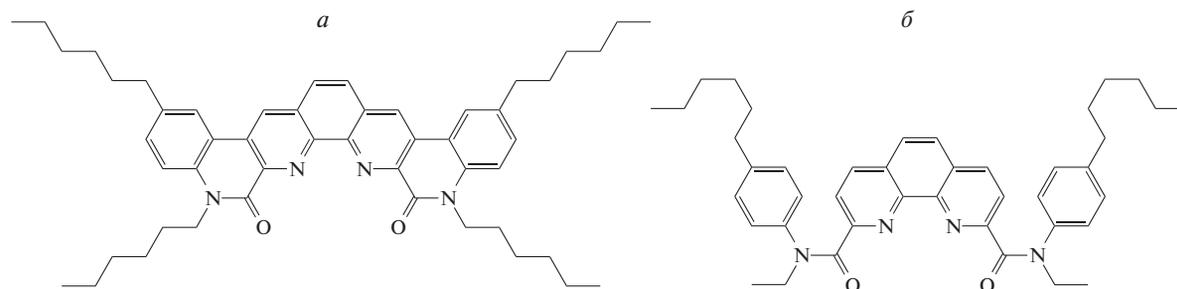


Рис. 5. Базовые структуры диамидов фенантралиндикарбоновых кислот, исследованные для разделения редкоземельных элементов и минорных актинидов, а также америция и кюрия
a – с предорганизованной структурой; *б* – с подвижной структурой

ной хроматографии. В результате получено 1.39 г Am с чистотой более 99.9% (96% от исходного количества). Объединённая фракция Cm содержала 36.4 мг Am (около 2.6% исходного количества). Количество Am в фракциях Am-Eu и Am-Cm не превышало 4% от его исходного количества. Использование монодисперсного сульфокатионита производства ООО “Техносорбент” позволило достичь высокого выхода и чистоты Am-фракции, при этом зоны смешения Am-Cm и Am-Eu оказались незначительными по объёму.

В рамках сотрудничества ГК “Росатом”, компании “Иннопрактика” и МГУ им. М.В. Ломоносова и РАН исследованы различные высокоселективные экстракционные системы для разделения как редкоземельных элементов и минорактинидов, так и америция и кюрия. По результатам суперкомпьютерного моделирования и проведённых затем исследований выявлены экстрагенты (диамиды фенантралиндикарбоновой кислоты – рис. 5), которые, по данным теоретического прогноза, должны обладать высокой селективностью в процессах экстракционного разделения трёхвалентных *f*-элементов. Был разработан и осуществлён синтез большой серии соединений этих типов, получены значения факторов селективности при разделении стандартной пары америций/европий $SF_{Am/Eu} \geq 150$ и при разделении пары америций/кюрий $SF_{Am/Cm} \geq 7$, что близко к рекордным значениям, достигнутым на сегодняшний день в мире. Разработан и успешно испытан новый подход к созданию экстракционных систем для разделения актинидов и лантанидов, основанный на применении гидрофильного и гидрофобного лигандов в водной и органической фазах соответственно (стратегия гидрофильно-гидрофобной пары), позволяющий существенно улучшить селективность разделения целевых металлов.

Важно, что предложенные лиганды обладают высокой радиационной и гидролитической

устойчивостью, не теряют своих экстракционных свойств при γ -облучении до доз 500 кГр и при α -облучении до доз порядка 200–300 кГр, процесс экстракции быстрый и полностью обратимый. Кроме того, разработанная экстракционная система пожаровзрывобезопасна.

При испытаниях на экстракторах центробежного типа (Радиевый институт им. В.Г. Хлопина) из азотнокислых растворов, содержащих смесь америция и кюрия (суммарная концентрация 0.11 г/л), удалось выделить в отдельную фракцию не менее 99% америция с чистотой не менее 99.9% (по кюрию). Более того, исходный раствор содержал такие мешающие компоненты, как нитрат аммония (570 г/л), диэтилентриаминпентауксусную кислоту (10 г/л), аминоксусную кислоту (5 г/л) и примесь плутония. Это не помешало разделению целевых компонентов.

Новые безопасные матрицы для иммобилизации РАО. Ввиду высокой радиационной опасности и химической токсичности высокорadioактивных отходов для последующего хранения их необходимо переводить в более безопасную форму. К настоящему времени до стадии промышленного применения доведена единственная технология – остекловывания ВАО. Она включает в себя процессы сушки, кальцинации, сплавления со стеклообразующими добавками в специальных печах (плавителях) и разлива в канистры для долговременного хранения. Технология остекловывания применяется для отверждения нефракционированных ВАО во Франции, России, Великобритании, США и других странах. Чаще всего используют стекло на боросиликатной основе, а в России – на алюмофосфатной основе [28].

Выбор состава матричного материала для иммобилизации ВАО зависит прежде всего от химического состава самих этих отходов, а также от типа применяемого плавителя и другого оборудования, геологических условий дальнейшего хранения и т.п. Чаще всего в этих целях использу-

ются боросиликатные стёкла, которые получают при температурах 1050–1200°C. Они обладают высокой химической и радиационной устойчивостью, хорошими механической прочностью, теплопроводностью, вязкостью. В то же время характеризуются низкой растворимостью по отношению к актинидам, редкоземельным и ряду переходных элементов. Алюмофосфатные стекла, получаемые при меньших температурах (800–1000°C), способны растворять большие количества этих компонентов ВАО, чем боросиликатные стёкла, однако характеризуются более резким изменением вязкости с температурой и обладают меньшей кристаллизационной устойчивостью, а области составов стекла с высокой химической устойчивостью у них меньше.

Известна высокая физико-химическая стабильность в геологической среде природных фосфатных минералов (монацит, апатит), содержащих природный уран и торий в концентрациях, достигающих десятков массовых процентов. Это указывает на перспективность использования синтетических аналогов минералов в качестве матриц для иммобилизации РАО. Прорывные результаты в последние годы [29–31] были получены при исследовании возможности использования кристаллического двойного ортофосфата магния и калия (МКФ) в качестве синтетических матриц для долговременного и экологически безопасного хранения (или захоронения) жидких РАО, в том числе актинид-содержащих отходов. Синтез МКФ-матрицы происходит в водном растворе согласно реакции:



Нетермический процесс (комнатная температура, атмосферное давление) получения МКФ-матриц подобен цементированию и характеризуется незначительными энергозатратами, простой реализации и мобильностью процесса отверждения, а простота аппаратного оформления метода приводит к минимизации “вторичных” РАО. Использование МКФ обеспечивает ряд ощутимых преимуществ: возможность отверждения отходов в широком диапазоне их рН, высокую степень наполнения полученных матриц компонентами РАО, высокую химическую и радиационную устойчивость, а также устойчивость к воздействию низких температур.

* * *

Ядерная энергетика – единственный высококонцентрированный “зелёный” источник электроэнергии, доля которого в мировой выработке, по всей видимости, будет увеличиваться. Согласно сценарию декарбонизации (производство не более 50 г СО₂ на кВт выработанной электроэнергии), к 2040 г. долю ядерной энергетике предпо-

лагается увеличить на 55% – до 4320 ТВт · ч вырабатываемой электроэнергии. Однако реализация ядерного топливного цикла нового поколения должна включать решение проблем накапливающихся радиоактивных отходов, их минимизацию при максимальном использовании потенциала делящихся материалов путём их мультирециклирования. Эта стратегия базируется на двухкомпонентной ядерной энергетике – тепловые реакторы с низким коэффициентом воспроизводства производят дешёвое электричество, а реакторы на быстрых нейтронах с коэффициентом воспроизводства больше 1 обеспечивают топливную базу всей системы и утилизируют ОЯТ тепловых реакторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bequerel H.* Sur les radiations emises par phosphorescents // Compt. Rend. Acad. Sc. 1896. V. 122. P. 420–421.
2. *Curie P., Sklodowska-Curie M.* Sur une substance nouvelle radioactive contenue dans la peachblende // Compt. Rend. Acad. Sc. 1898. V. 127. P. 175–176.
3. *Curie P., Curie M., Bemond G.* // Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende // Compt. Rend. Acad. Sc. 1898. V. 127. P. 1215–1217.
4. *Debierne A-L.* Sur une nouvelle matière radio-active // Compt. Rend. Acad. Sc. 1899. V. 129. P. 593–595.
5. *Rutherford E.* A radio-active substance emitted from thorium compounds // Philos. Mag. 1900. V. 49. P. 1–14.
6. *Dorn E.* Elektrostatische Ablenkung der Radiumstrahlen // Abhandl. Naturforsch Ges. 1900. V. 22. P. 1–15.
7. *Вернадский В.И.* Очерки и речи. Т. 1. Пг.: Научхимтехиздат, 1922.
8. *Зайцев Л.Л., Фигуровский Н.А.* Исследования явлений радиоактивности в дореволюционной России. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
9. *Крот Н.Н., Гельман А.Д.* О получении нептуния и плутония в семивалентном состоянии // Доклады АН СССР, 1967. Т. 177. № 1. С. 124–126.
10. *Myasoedov B.F.* New methods of transplutonium element separation and determination // J. All. Comp., 1994. V. 213–214. P. 290–299.
11. *Mikheev N.B., Myasoedov B.F.* Handbook of the physics and chemistry of the actinides // Elsevier Science Publ. 1985. V. 3. P. 347–386.
12. *Колтунов В.С.* Кинетика реакций актиноидов. М.: Атомиздат, 1974.
13. Principles and practices of solvent extraction. Second Edition, Revised and Expanded / Ed. by J. Rydberg, M. Cox, C. Musikas, G.R. Choppin. New York: Marcel Dekker, 2004.
14. *Виноградов А.П.* Физико-химические методы контроля производства урана // Доклады советской делегации на международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955. М.: Изд-во АН СССР, 1955.

15. IAEA Power Reactor Information System. <https://pris.iaea.org/pris/>
16. *Ceyhan M., Lee J.S.* Proceedings of the international conference on management of spent fuel from power reactors. IAEA, Vienna, 2006.
17. IAEA: Implications of Partitioning and Transmutation in Radioactive Waste Management. Vienna: IAEA, 2004.
18. *Khapersaya A., Kruykov O., Ivanov K.* SNF management in Russia: Status and future development. International Conference on the Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling the Future. IAEA-CN-272/53, 2020, Paper ID #25, p. 93–98.
19. *Fedorov Yu.S., Baryshnikov M.V., Bibichev B.A. et al.* Multiple recycle of REMIX-fuel based on reprocessed uranium and plutonium mixture in thermal reactors // Global 2013, Salt Lake City, Utah, September 29–October 3, 2013.
20. *Sheremetev A., Koulupaev D.* Experience and prospects of spent nuclear fuel reprocessing at Mayak. Management of spent fuel. From nuclear power reactors. Learning from the past, enabling the future. Proceedings of an International Conference IAEA-CN-272/53, 2020, Paper ID #53, p. 161–166.
21. *Пономарёв-Степной Н.Н.* Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 4. С. 183–191.
22. *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. 2012. Т. 112. № 6. С. 319–330.
23. Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / Под общ. ред. Е.О. Адамова. М.: НИКИЭТ, 2020.
24. *Kolupaev D., Logunov M., Shadrin A.* Used mixed oxide fuel reprocessing at RT-1 plant // Procedia Chemistry. 2016. V. 21. P. 198–202.
25. *Shadrin A.Yu., Dvoeglazov K.N., Maslennikov A.G. et al.* PH Process as a Technology for Reprocessing Mixed Uranium–Plutonium Fuel from BREST-OD-300 Reactor // Radiochemistry. 2016. V. 58. № 3. P. 271–279.
26. *Kulyako Y.M., Trofimov T.I., Pilyushenko K.S. et al.* Preparation of Powdered Uranium Oxides by Denitration of Nitric Acid Uranium Solutions Using UHF Radiation // Radiochemistry. 2019. V. 61. № 1. P. 1–4.
27. *Kulyako Y.M., Vinokurov S.E., Trofimov T.I. et al.* Preparation of Solid Solutions of Uranium and Cerium Oxides from Their Nitric Acid Solutions Using Microwave Radiation // Radiochemistry. 2019. V. 61. № 6. P. 661–664.
28. *Stefanovsky S.V., Yudintsev S.V., Giere R., Lumpkin G.R.* Nuclear Waste Forms. Energy, Waste and the Environment. // A Geological Perspective, Geological Society, Special Publication. 2004. V. 236. P. 37–63.
29. *Vinokurov S.E., Kulikova S.A., Myasoedov B.F.* Solidification of high level waste using magnesium potassium phosphate compound // Nuclear Engineering and Technology. 2019. V. 51. № 3. P. 755–760.
30. *Kulikova S.A., Belova K.Y., Vinokurov S.E., Tyupina E.A.* Conditioning of Spent Electrolyte Surrogate LiCl-KCl-CsCl Using Magnesium Potassium Phosphate Compound // Energies. 2020. V. 13. № 8. P. 1963–1985.
31. *Lizjin A.A., Yandaev D.M., Shadrin A.Yu. et al.* Radiation and Chemical Stability of a Magnesium-Phosphate Matrix for ¹⁴C Immobilization // Radiochemistry. 2020. V. 62. № 1. P. 131–137.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2021 г. Е. П. Велихов^а, В. И. Ильгисонис^{б,*}

^а Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

^б Государственная корпорация по атомной энергии “Росатом”, Москва, Россия

*E-mail: vilkie@gmail.com

Поступила в редакцию 14.01.2021 г.

После доработки 19.01.2021 г.

Принята к публикации 26.01.2021 г.

В работе обсуждаются возможные перспективы термоядерных исследований в первой половине XXI в. и их имплементации в практической сфере отечественной энергетики. Делается вывод о том, что термоядерные исследования способны выступать и уже выступают мощным драйвером научно-технологического прогресса, механизмом, стимулирующим развитие высокотехнологичных сегментов экономики страны, и возможным элементом ядерной энергетики будущего. Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на Общем собрании членов РАН 8 декабря 2020 г.

Ключевые слова: ядерная энергетика, управляемый термоядерный синтез, токамак, тройное производство, ядерный реактор, термоядерный источник нейтронов, дивертор, бланкет, тритиевый топливный цикл.

DOI: 10.31857/S0869587321050248

Почти 70 лет системных исследований ведущих мировых стран в области управляемого термоядерного синтеза (УТС) с неизбежностью требуют подтверждения актуальности целей и доказательств продуктивности таких исследований. Мнения о том, что дорогостоящие исследования и разработки в области УТС бесперспективны, выбранные подходы неверны, а поставленные задачи нерешаемы и необоснованны регулярно по-

являются как в средствах массовой информации, так и в прогнозных оценках государственных и околосударственных структур. Эти мнения отнюдь не всегда исходят от дилетантов, их можно услышать и из уст профессионалов в области ядерной энергетики и физики плазмы [1]. При этом недооцениваются важнейший, как сегодня представляется, фактор технологического развития, необходимого для реализации термоядерных технологий, и существующие уже сейчас возможности их практического использования, а физические и технологические трудности, стоящие на пути реализации УТС, гипертрофируются. Этим и некоторым другим вопросам термоядерных исследований и посвящена настоящая статья. Предметом обсуждения будут исследования с использованием установок типа токамак — замкнутых систем магнитного удержания высокотемпературной плазмы, являющихся с 1970-х годов наиболее продвинутыми и эффективными. Наличие ряда предшествующих обзоров [2–4], описывающих состояние и перспективы УТС, оправдывает краткость изложения позиции авторов в настоящей статье.



ВЕЛИХОВ Евгений Павлович — академик РАН, почётный президент НИЦ “Курчатовский институт”. ИЛЬГИСОНИС Виктор Игоревич — доктор физико-математических наук, директор направления научно-технических исследований и разработок Госкорпорации “Росатом”.

МЫ БЫЛИ ПЕРВЫМИ

В условиях ограниченности ресурсов, выделяемых на научно-технологическое развитие, для

крупных корпораций или целых стран неизбежна постановка вопроса о выборе приоритетов, решаемого зачастую волевым образом или посредством лоббирования. К числу более или менее объективных критериев выбора таких приоритетов можно отнести следующие:

- наличие компетенций и серьёзных заделов в разработке направления развития (при их отсутствии трудно претендовать на достижение технологического лидерства);
- научно- и трудоёмкость направления (в отсутствие которых преимущество — на стороне малого и среднего бизнеса как более гибкого и оперативного);
- долговременность и стратегический характер реализации направления (без чего масштабные вложения в данное направление окажутся неоправданными);
- быстрое развитие смежных/побочных направлений (что позволяет оправдывать, хотя бы частично, вложения в ходе решения основной задачи, демонстрируя их продуктивность).

Более подробно позиция авторов о роли и месте прикладной науки изложена в статье [5]; здесь же отметим, что термоядерные исследования в России с использованием токамаков вполне соответствуют вышеуказанным критериям.

Не углубляясь в историю отечественных термоядерных исследований, неоднократно описанную с разной степенью детализации (см., например, [6, 7]), укажем на ключевые достижения мирового уровня, позволяющие обоснованно утверждать о наличии необходимых компетенций российских учёных в этой области.

1955 г. — сооружён тор с магнитным полем (ТМП — прообраз токамака);

1958 г. — запущена установка Т-1 — первый токамак из нержавеющей стали;

1959 г. — создан токамак Т-2 (содержит прогретаемую камеру и все базовые системы современных токамаков);

1962 г. — на токамаке ТМ-2 применены обмотки вертикального поля;

1968 г. — на конференции МАГАТЭ (г. Новосибирск) доложены результаты рекордных экспериментов на токамаке Т-3А (получена температура электронов $T_e \approx 1$ кэВ при энергетическом времени жизни $\tau_E \approx 20$ мс);

1973 г. — на токамаке Т-9 продемонстрированы преимущества вытянутого сечения плазмы, ранее предсказанные теоретически;

1975 г. — на токамаке Т-10 применение нового устройства электронного циклотронного нагрева — гиротрона — позволило впервые достичь термоядерной температуры $T_e \approx 9$ кэВ;

1976 г. — запущен токамак Т-12, на котором впервые получена диверторная¹ магнитная конфигурация и продемонстрирована стабилизация вертикальной неустойчивости плазмы;

1979 г. — запущен первый в мире токамак со сверхпроводящими обмотками магнитного поля Т-7; применён метод неиндукционного поддержания тока;

1988 г. — осуществлён физический пуск токамака Т-15 (оснащён магнитной системой с использованием передового сверхпроводника NbSn и системами мультимегаваттного дополнительного нагрева плазмы: 10 МВт гиротронами и 9 МВт инжекцией быстрых атомов).

К этим экспериментально проверенным достижениям, впоследствии взятым на вооружение во всём мире, следует добавить широко признанные теоретические разработки, лёгшие в основу современной теоретической физики высокотемпературной плазмы.

ЗА ЧТО БОРЕМСЯ

Главным целевым параметром, достижение требуемого значения которого обеспечит термоядерное “горение” с положительным энергобалансом дейтериево-тритиевой смеси², служит так называемое тройное произведение

$$nT\tau_E \geq 3.5 \times 10^{28} \text{ м}^{-3} \text{ К с}, \quad (1)$$

где n — концентрация, а T — температура ионов плазмы. При этом существенны и самостоятельные значения величин, входящих в тройное произведение, а именно следует обеспечить

$$n \geq 10^{20} \text{ м}^{-3}, \quad T \geq 10^8 \text{ К}, \quad \tau_E \geq 1 \text{ с}. \quad (2)$$

На практике важно добиться квазистационарной работы реактора, поэтому кроме параметров (1), (2) имеет значение ещё и длительность разряда.

Прогресс, достигнутый в результате многолетних исследований на токамаках, не следует недооценивать. Достижение всех необходимых для реализации УТС значений параметров (2) сегодня продемонстрировано экспериментально, но, к сожалению, в разных экспериментах (табл. 1). Полученные значения тройного произведения более чем в 1000 раз превышают данные середины 70-х годов прошлого века, когда стартовали первые крупные токамаки с дополнительным нагре-

¹ Дивертор — конструктивный элемент современного токамака или иного термоядерного устройства, обеспечивающий эффективный приём основных потоков частиц и энергии с периферии высокотемпературной плазмы.

² Сегодня УТС ориентирован преимущественно на реакцию между дейтерием и тритием. Другие возможности, в том числе так называемые безнейтронные реакции, могут быть реализованы при существенно более высоких значениях параметров (в первую очередь температуры) плазмы, пока недостижимых.

Таблица 1. Экспериментально полученные значения параметров плазмы в токамаках, отвечающие требованиям УТС

Токамак	Страна	Год	Достижение
TFTR	США	1986	тройное произведение = $1.74 \times 10^{28} \text{ м}^{-3} \text{ К с}$ температура = $2 \times 10^8 \text{ К}$
Alcator C-Mod	США	2016	$n = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$; давление плазмы = 2.05 атм тройное произведение = $0.8 \times 10^{28} \text{ м}^{-3} \text{ К с}$
JT-60U	Япония	2013	температура = $5.2 \times 10^8 \text{ К}$ тройное произведение = $1.77 \times 10^{28} \text{ м}^{-3} \text{ К с}$ энергетическое время жизни = 1.1 с
TRIAM-1M	Япония	2005	стационарная работа 5 ч 16 мин
EAST	КНР	2017	длительность 17 мин, в Н-мод* – 101.2 с
JET	Великобритания	1996, 1998	термоядерный выход мощностью 16.1 МВт длительность 20 с
KSTAR	Республика Корея	2020	энергетическое время жизни = 1 с температура = $5.2 \times 10^8 \text{ К}$

*Н-мода (от английского *High-mode*) – режим улучшенного удержания плазмы в токамаке (обычно – в токамаке с дивертором), характеризуемый повышенной (при том же энергокладе) температурой плазмы в центре токамака и довольно резким скачком температуры на его периферии (“транспортный барьер”).

вом плазмы³. На токамаках TFTR и JET в работе с дейтериево-тритиевой плазмой достоверно зарегистрировано протекание термоядерных реакций синтеза, причём на токамаке JET – с рекордным термоядерным тепловыделением [8], мощность которого оказалась сравнимой с мощностью, введённой в плазму (коэффициент выхода $Q = 0.67$; при $Q \geq 1$ можно говорить о положительном энерговыходе – так называемая точка безубыточности, breakeven). Также доказана возможность длительной работы токамака, правда, лишь в относительно “спокойных” режимах при значениях параметров плазмы, отличных от требуемых (2).

ЗАЧЕМ НУЖЕН ИТЭР

Общеизвестно, что повышение времени жизни плазмы можно обеспечить путём увеличения размеров токамака и величины магнитного поля. И то, и другое сопряжено с существенным удорожанием установки. Вот почему следующим шагом по проторённой “токамачей” дороге к овладению УТС было решено делать общими усилиями в рамках проекта международного термоядерного

экспериментального реактора ИТЭР, участниками которого в итоге стали страны Евросоюза, Индия, КНР, Республика Корея, Российская Федерация, США и Япония (всего 35 стран). Именно на реализацию проекта ИТЭР в последнее десятилетие были направлены основные усилия мирового термоядерного сообщества. При этом большинство участников вполне плодотворно использовали добытые общими усилиями при проектировании ИТЭРа знания и технические решения в своих национальных программах. Так, в соответствии с таблицей, лидерами сегодня следует признать сверхпроводящие токамаки: китайский EAST и корейский KSTAR; Япония совместно с ЕС завершает строительство нового сверхпроводящего токамака JT-60SA, намереваясь ввести его в строй уже к концу 2021 г., – на 4 года раньше планируемого срока получения первой плазмы в ИТЭРе. И наоборот, данные, получаемые в ходе исследований, выполняемых национальными командами, анализируются и учитываются в проекте ИТЭР. Отметим, что планируемые режимы работы ИТЭРа основаны на довольно консервативных представлениях и достаточно обоснованы предшествующими экспериментами [9]. Вместе с тем ИТЭР – это качественный скачок в токамакостроении. Для примера: объём плазмы ИТЭРа равен 840 м^3 , что более чем в 10 раз превосходит объём плазмы са-

³ Дополнительным называется нагрев плазмы за счёт внешних источников вводимых в плазму излучения или быстрых частиц – в отличие от омического (индукционного) нагрева плазмы токамака протекающим по плазме током.

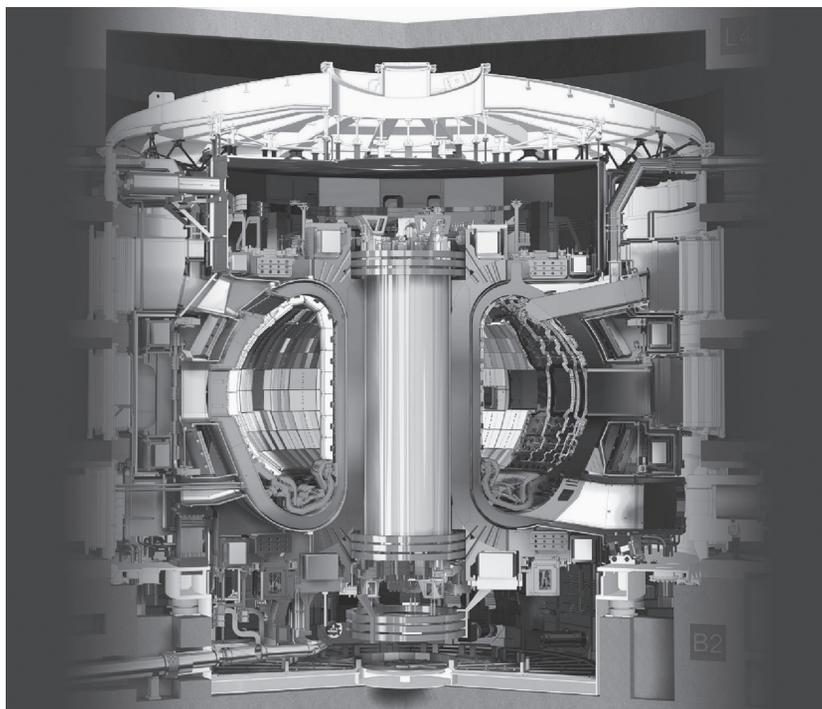


Рис. 1. Схема в разрезе токамака ИТЭР

Источник: <https://www.iter.org/mach>.

мого крупного из действующих токамаков — токамака JET.

Строительство и запуск ИТЭРа призваны продемонстрировать работоспособность идеологии, позволяющей создать на базе токамака термоядерный энергетический реактор. При этом сам ИТЭР таковым ещё не будет; его основная задача — подтвердить экспериментально возможность квазистационарного (длительностью до ~50 мин) режима термоядерного горения с выделением термоядерной энергии, в 5 раз превышающей энергию, вкладываемую в плазму ($Q = 5$); при этом предполагается неиндукционное поддержание тока в течение разряда. С использованием дополнительного нагрева мощностью 50 МВт предполагается получить 500 МВт термоядерной мощности ($Q = 10$) при индуктивном поддержании тока в течение 400 с. Основной задачей экспериментов на ИТЭРе будут отработка и испытание важнейших технологий и компонентов реактора.

Необходимо отметить, что, несмотря на “консервативный” характер планируемых режимов ИТЭРа, целый ряд технологических решений будет опробован впервые; это относится, например, к испытаниям модулей бланкета для наработки трития. Принципиально важной станет проверка концепции использования вольфрама в качестве материала для диверторных пластин — как самого тугоплавкого металла — в условиях ожидаемых на

ИТЭРе огромных потоков энергии. Напомним, что наилучшие режимы удержания плазмы получены сегодня при использовании покрытий с низким зарядовым числом атомов в составе покрытия — углерода и бериллия; в ИТЭРе этими материалами будет покрыта первая (обращённая к плазме) стенка вакуумной камеры. Вопрос о том, будут ли и в каком количестве ионы вольфрама поступать в основную плазму, снижая её температуру за счёт излучения, может быть окончательно решён только в ходе экспериментов на ИТЭРе.

Начиная с 2016 г. проект ИТЭР развивается вполне успешно, выполнено более 70% объёма работ, необходимых для получения первой плазмы. В августе 2020 г. Международная организация ИТЭР официально объявила о начале сборки на площадке в Сен-Поль-Ле-Дюранс (Франция) собственно токамака (рис. 1). Это событие стало предметом пристального внимания со стороны масс-медиа и заслужило ряд приветственных обращений высшего политического руководства стран — участников проекта. Отметим, что в случае соблюдения действующего ныне графика строительства, выполнения всеми сторонами своих обязательств и преодоления последствий пандемии 2020–2021 гг. первая плазма в токамаке ИТЭР будет получена в 2025–2026 гг., а на реальный режим работы на дейтериево-тритиевой смеси токамак выйдет не ранее 2035 г.

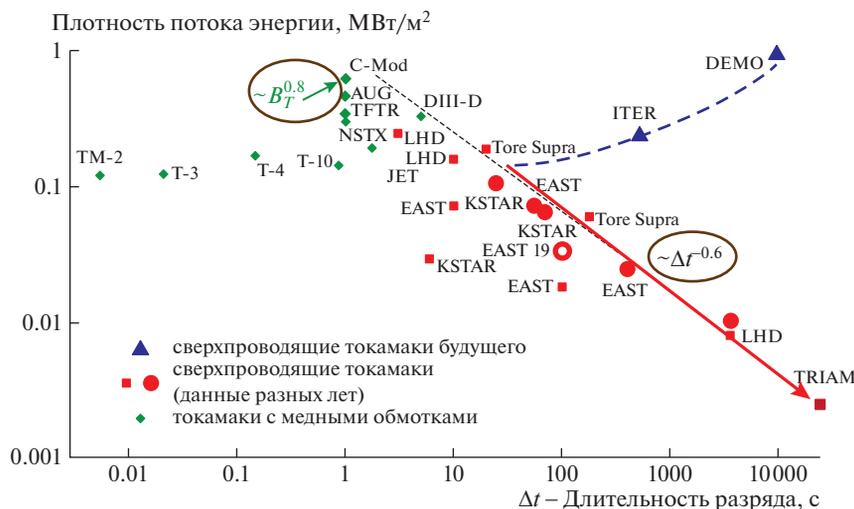


Рис. 2. Данные экспериментов на токамаках на плоскости “длительность разряда – плотность потока энергии на стенку” [11]

ТОКАМАК СЕГОДНЯ – ЧТО НЕ ТАК?

С учётом накопленного за прошедшие десятилетия опыта проведения термоядерных исследований естественно задаться вопросом: можно ли указать основные научно-технические и/или инженерные проблемы, препятствующие скорейшему достижению необходимых для УТС значений (2) параметров плазмы и созданию термоядерного реактора-токамака? По мнению авторов, основные проблемы вполне понятны и могут быть поименованы.

Во-первых, это колоссальная технологическая сложность самого устройства, которая особенно ясно проявилась в проекте ИТЭР. 50 лет назад токамаки победили в соревновании различных систем для удержания плазмы, во многом благодаря своей идейной простоте. Протекающий по плазме токамака электрический ток в тороидальном магнитном поле обеспечивает как формирование итоговой магнитной конфигурации, являющейся идеальной ловушкой для удержания частиц плазмы, так и нагрев этой плазмы. Однако для длительного устойчивого удержания плазмы термоядерных параметров требуется множество инженерных систем, создание которых находится на пределе имеющихся технологических возможностей. Так, например, стационарность требует сверхпроводимости магнитных обмоток; при этом на стенку камеры и в дивертор идут колоссальные потоки тепла. Понятно, насколько серьёзными должны быть инженерные решения, обеспечивающие такое соседство. Другой пример связан с необходимостью создания мощных источников высокоэнергичных нейтральных атомов – речь идёт о нескольких мегаваттах мощности при энергии в сотни и даже тысячи килоэлектрон-

вольт (в ИТЭРе два таких источника суммарной мощностью 33 МВт должны выдавать потоки МэВных⁴ частиц в течение часа; ранее таких источников просто не существовало!).

Во-вторых, это достаточно очевидная проблема длительного поддержания тока. Униполярный электрический ток, наводимый в тороидальной плазме при помощи индуктора, не может существовать вечно (с электротехнической точки зрения токамак представляет собой трансформатор с одновитковой вторичной обмоткой – плазмой). Сегодня предложено и экспериментально проверено несколько способов неиндукционного поддержания тока, среди которых уже упомянутая инжекция пучков быстрых нейтральных атомов. Можно использовать и ввод обладающих компонентой импульса в тороидальном направлении электромагнитных волн различного диапазона: электронного циклотронного, нижнегибридного, а также свистового (волны-геликоны). Весьма интересен и крайне важен так называемый бутстрэп-эффект (bootstrap), заключающийся в формировании анизотропной функции распределения заряженных частиц неоднородной плазмы в магнитной конфигурации токамака (эффект связан с тороидальной геометрией токамака и в цилиндре отсутствует). Доказанная в экспериментах возможность обеспечить более 80% тока за счёт бутстрэп-эффекта [10] при наличии эффективных средств нагрева плазмы фактически выводит задачу поддержания тока из числа критических проблем УТС. Точно так же большинство физических вопросов, казавшихся непреодоли-

⁴ 1 мегаэлектронвольт (МэВ) $\approx 1.60 \times 10^{-9}$ эрг $\approx 1.60 \times 10^{-16}$ Дж, что, по формуле Эйнштейна, составляет примерно одну промилле атомной единицы массы.

мыми на начальном этапе работ по УТС, таких как управление равновесием, многочисленные неустойчивости, аномальные процессы переноса, сегодня решены на практическом уровне.

В конечном счёте наиболее принципиальной сегодня можно считать задачу устранения негативного воздействия стенки, ограничивающей разряд, и других взаимодействующих с плазмой элементов. Проблема взаимодействия плазма–стенка для УТС двоякая. С одной стороны, это вопрос стойкости материала, который, бомбардируемый выходящими из плазмы потоками частиц и излучения, охрупчивается, накапливает структурные дефекты (особенно под воздействием нейтронов), растрескивается, иногда плавится и/или распыляется. Экстремально высокий уровень тепловой нагрузки ($\sim 2\text{--}3\text{ МВт/м}^2$ на первую стенку и внутрикамерные элементы, $\sim 10\text{ МВт/м}^2$ на пластины дивертора или лимитера) требует, по сути, разработки и синтеза принципиально новых термостойких конструкционных и функциональных материалов. С другой стороны, существует обратное влияние на плазму. Выбываемые из стенки примесные атомы и молекулы поступают и могут накапливаться в плазме, приводя к дополнительным потерям на излучение, диссипации тока и даже деградации разряда. Накопление примесей вблизи стенки (продуктов её эрозии) увязывают с сокращением длительности разряда. Кроме того, стенка может довольно эффективно абсорбировать изотопы водорода, служащие термоядерным горючим.

На рисунке 2, заимствованном из работы [11], экспериментальные режимы имеющихся токамаков отмечены точками на плоскости “длительность разряда – плотность потока энергии на стенку”. Отчётливо видно, что для сверхпроводящих систем повышение длительности разряда пока удаётся совмещать только со снижением нагрузки на стенку. Имеются представления, что нагрузка ограничена электрическими пробоями плазменного слоя, поэтому причиной снижения продолжительности разряда Δt с ростом нагрузки может быть постепенное накопление продуктов эрозии в зонах контакта плазмы с первой стенкой токамака, способствующее таким пробоям.

Возможности довольно кардинального решения задачи плазма–стенка просматриваются уже сегодня. Одна из них заключается в использовании жидкого лития как материала с низким зарядовым числом в промежуточном слое между плазмой и стенкой или пластинами дивертора. При этом возможные функции такого литиевого слоя могут несколько различаться.

Струя циркулирующего лития может стать приёмником потока тепла, приходящего на диверторные пластины, а также поглотителем продуктов эрозии, гелия и “избыточного топлива”.

Литий должен собираться специальными литиев-сборниками и очищаться от абсорбированных продуктов – но уже вне камеры. Извлечённые изотопы водорода направляются в систему подачи топлива. Кроме того, часть принимаемой литиевым слоем энергии может высвечиваться в виде ультрафиолетового излучения, снижая температуру пристеночной плазмы и способствуя более равномерному распределению тепловой нагрузки по стенке камеры [11]. Большие объёмы циркулирующего лития и его проникновение в основную плазму – вот основные трудности на пути реализации этого подхода.

Можно ли обеспечить относительно быстрое ламинарное течение тонкого слоя жидкого лития по металлической пластине, полностью поглощающего попадающие в него частицы плазмы (так называемый случай нулевого рециклинга)? Будет ли при этом автоматически достигаться улучшение удержания плазмы в основном объёме реактора и, как следствие, повышение температуры? Ключевая идея, лежащая в основе этого подхода, заключается в том, что для получения и удержания высокотемпературной плазмы гораздо проще предотвратить теплопроводностное охлаждение её границы, поглощая уходящие частицы и запрещая обратный “холодный” поток в плазму, чем увеличивать мощность нагрева и бороться с растущими потерями за счёт турбулентной теплопроводности при наличии контакта плазмы с холодной стенкой. Продуктивность этой концепции [12] и иных возможностей использования лития требует детальной экспериментальной проверки.

Дальнейшая экстраполяция этой концепции заключается в полном отказе от стенки, ограждающей плазменный объём. Речь идёт о проработке возможности сооружения магнитного термоядерного реактора в космосе на околоземной орбите. Такой подход имеет ряд потенциальных преимуществ (включая гарантированную реализацию нулевого рециклинга), хотя и представляется труднореализуемым. При этом магнитная конфигурация термоядерного реактора космического базирования может и должна быть предметом оптимизации, в том числе по параметрам (таким как вес, присутствие дополнительных систем, простота монтажа и пр.), малосущественным для стандартного токамака, но крайне важным для объекта в космосе. Поэтому реализацию этого направления следовало бы начать с глубокой концептуальной проработки и маломасштабных космических экспериментов. Следует отметить, что идеи космического размещения энергетического реактора обсуждались ещё в 1970-х годах. Целесообразность их рассмотрения в настоящий момент оправдывается качественно иным достигнутым уровнем развития космонавтики, с одной стороны, и прогрессом в термоядерных технологиях и в

понимании физики термоядерной плазмы, с другой стороны, что переводит эти идеи из области гипотез в сферу проектов, доступных для воплощения в жизнь за обозримое время, хотя они и не имеют пока достаточно сторонников для серьёзной проработки.

ГИБРИДНЫЕ РЕАКТОРЫ И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Идеология “чистого” термоядерного синтеза никогда не была в России единственной. Практически с момента начала работ над УТС высказывались идеи об использовании термоядерных нейтронов для производства делящихся изотопов как основы ядерного топлива для АЭС или боеприпасов. В своих воспоминаниях, относящихся к 1951 г., А.Д. Сахаров пишет: “Важное моё предложение об использовании нейтронов термоядерного реактора для целей бридинга — т.е. для производства при захвате нейтронов урана-233 из тория-232 и плутония-239 из природного урана-238 — вероятно, было сформулировано несколько позже приезда комиссии. Так как выделение энергии на один акт реакции при процессе деления гораздо больше, чем при процессе синтеза, экономические и технические возможности такого комбинированного двухступенчатого производства энергии оказываются выше, чем при получении энергии непосредственно в термоядерном реакторе. Делящиеся материалы производятся при этом в МТР⁵ и затем сжигаются в атомных реакторах сравнительно простой конструкции, более простых, чем реакторы на быстрых нейтронах, в которых к тому же накопление делящихся материалов происходит сравнительно медленно” [13, с. 201].

Сегодня при анализе так называемого гибридного подхода, сочетающего термоядерный источник нейтронов (ТИН) и окружающий его бланкет с сырьевым материалом или отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), гибридный реактор рассматривают в двух возможных ипостасях: как наработчик топлива для традиционных реакторов деления, используемых на существующих или планируемых АЭС, и как высокоэффективный дожигатель минорных (младших) актинидов, накапливающихся в результате работы ядерных реакторов.

Главное преимущество гибридного реактора по сравнению с любой другой ядерной установкой, обеспечивающей конверсию сырьевых изотопов в делящиеся и/или переработку миноров, заключается в использовании термоядерных нейтронов высокой энергии, что позволяет в несколько раз увеличить интенсивность процессов

наработки новых делящихся изотопов из сырьевых или переработки ОЯТ при одинаковой мощности установок. Это важнейшее качество приводит к тому, что присутствие гибридных термоядерных реакторов в структуре ядерной энергетической системы можно ограничить небольшой долей (менее 10–15%) и при этом в полном объёме решить проблему обеспечения топливом. Реакторы деления, составляющие основу существующей атомной энергетики, будут обеспечены делящимися изотопами, произведёнными в гибридных реакторах. Существенно, что бланкет гибридного реактора работает в подкритическом режиме с внешним источником нейтронов, что исключает последствия запроектных аварий с изменением мощности (реактивностные аварии) и с захолаживанием теплоносителя без срабатывания систем защиты.

Оценки показывают, что наибольший эффект в продвижении интегрированной (синтез–деление) технологии топливного цикла реализуется при ориентации на уран-ториевый топливный цикл, к числу преимуществ которого принято относить следующие. Уран-233 — делящийся изотоп, получаемый из природного тория, наиболее привлекателен для реакторов на тепловых нейтронах. Запасы тория-232 в природе в 3–4 раза больше в сравнении с природным ураном. При добыче тория радиационные нагрузки на окружающую среду принципиально меньше по сравнению с аналогичными, существующими при добыче природного урана. Облучение урана-233 в реакторе не сопровождается накоплением трансурановых актинидов, и проблема трансмутации минорных актинидов с целью создания условий экологической приемлемости современного уран-плутониевого цикла практически устраняется. Вместе с тем, хотя возможность использования ториевого цикла была известна и обсуждалась ещё на заре становления ядерной энергетики, исторически сделанный выбор в пользу уран-плутониевого цикла нельзя сбрасывать со счетов, равно как и определённые трудности, связанные с реализацией ториевого цикла.

Варианты продвижения гибридной концепции [14–17] с целью перехода к “зелёной” ядерной энергетике достаточно проработаны; известны и контраргументы [18], количественные ответы на которые могут быть получены посредством проведения соответствующих исследований. В любом случае эту концепцию следует рассматривать в увязке с экономикой и ключевыми проблемами атомной энергетики по обеспечению её устойчивого развития и замыкания топливного цикла.

Особенность настоящего момента заключается в том, что современный уровень знаний и имеющиеся наработки в области УТС достаточны для

⁵ Магнитный термоядерный реактор (МТР — принятая в то время аббревиатура).

создания ТИН, требования к параметрам плазмы и конструкционным материалам в котором заметно ниже, чем для энергетического реактора, и возможность удовлетворения которых уже подтверждена экспериментально. Помимо создания ТИНа также необходимы обеспечивающие работы, подтверждающие работоспособность элементов blankets, технологии подготовки/очистки/переработки его топливной композиции, технологии наработки трития.

В НАЦИОНАЛЬНЫХ ИНТЕРЕСАХ

Парадоксом постсоветского периода в области термоядерной науки и техники стало участие Российской Федерации в крупнейшем научно-техническом проекте современности – разработке и строительстве международного токамака-реактора ИТЭР – в отсутствие собственной национальной программы развития термоядерных исследований.

В соответствии с заключёнными для реализации проекта ИТЭР международными соглашениями каждый партнёр, в том числе Российская Федерация, имеет право на получение безвозмездных лицензий на использование технологий, созданных в рамках проекта ИТЭР для собственных (национальных) целей. Поэтому все участники проекта ИТЭР (кроме России) имеют собственные национальные программы и проекты, финансируемые на уровне, превышающем вклады этих стран в проект ИТЭР. Такие национальные программы необходимы, кроме всего прочего, для освоения и использования полученных при строительстве и последующей эксплуатации ИТЭРа результатов и технологий.

В начале 2016 г. на обращение президента НИЦ “Курчатовский институт” М.В. Ковальчука к главе государства было дано поручение подготовить национальную программу развития управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий. Сегодня элементы этой программы образовали федеральный проект “Термоядерные и плазменные технологии” в составе комплексной программы “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года”, разработанной Госкорпорацией “Росатом” в соответствии с Указом Президента РФ от 16.04.2020 № 270. Реализация комплексной программы начинается в 2021 г.

Средства федерального бюджета, выделяемые на осуществление данного федерального проекта (ФП), фактически будут единственным источником системного финансирования отечественных исследований в области УТС в ближайшие четыре года. Заметим, что наряду с описанными выше базовыми термоядерными технологиями (а техно-

логии ввода энергии и частиц в плазму, защиты первой стенки, а также системные исследования по фундаментальным вопросам равновесия, устойчивости, процессов переноса, управления разрядом применительно к высокотемпературной плазме в режиме термоядерного горения являются универсальными и необходимыми для любых термоядерных устройств) и технологиями гибридного реактора (где на передний план выходят вопросы работоспособности элементов blankets, нейтронной стойкости материалов и обоснование топливного цикла) в рамках ФП предполагается развитие инновационных плазменных технологий, способных продемонстрировать возможность планового внедрения выполняемых разработок и их востребованность нынешним промышленным комплексом страны. Здесь речь идёт о создании плазменных ракетных двигателей нового поколения, мощных источников электромагнитного излучения различного спектрального диапазона и назначения, источников интенсивных атомарных и ионных пучков для различных применений и других образцов новой техники. Кроме того, при взаимодействии с МАГАТЭ с учётом проведённых научно-исследовательских работ будет создана основа нормативной базы, регламентирующей полный жизненный цикл термоядерных и гибридных систем, работающих в нейтронных режимах, а также соответствующая мировому уровню система информационного и проектного обмена между участниками проекта и укреплена база для систематической подготовки кадров в области термоядерных исследований.

* * *

Подводя итог, следует отметить, что перспективы развития термоядерных исследований как в нашей стране, так и во всём мире тесным образом связаны с тем, в какой мере человечество намерено следовать идеям минимизации негативного воздействия на окружающую среду, сокращения выбросов углекислого и иных парниковых газов, накопления вредных отходов и т.п. Можно только присоединиться к часто цитируемым словам одного из первых руководителей термоядерных исследований в нашей стране академика Л.А. Арцимовича: “Эта проблема (проблема УТС. – Прим. авторов) обязательно будет решена, когда термоядерная энергия будет совершенно необходима человечеству, потому что принципиальных затруднений на этом пути, по-видимому, нет”.

За прошедшие десятилетия принципиальных затруднений (то есть запретов со стороны физической науки) проведённые исследования действительно не выявили. Более того, большинство казавшихся непосильными трудностей были успешно преодолены усилиями учёных и инженеров. Вместе с тем, хотя очевидной потребности

в термоядерной энергетике, в том числе потребности экономической, в настоящее время не существует ни в виде самостоятельного компонента, ни в паре с традиционной ядерной энергетикой, несмотря на прогнозируемые достоинства такого симбиоза, задача научных и инженерных исследований в области УТС заключается в необходимости сохранения профессиональных компетенций и обеспечения должной степени технологической готовности к возникновению такой потребности. Передовые научные достижения в конечном счёте формируют новые рынки, а не расширяют продажи на рынках существующих. С этой точки зрения крайне важно, что термоядерные исследования ведутся на пределе имеющихся технологических возможностей, выступая уже сегодня технологическим драйвером развития наукоёмких отраслей промышленности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем признательность всем коллегам по “термоядерному цеху”, в первую очередь членам НТС-6 Госкорпорации “Росатом”, сотрудникам НИЦ “Курчатовский институт”, отраслевых институтов “Росатома” и институтов РАН, работа которых позволила сформировать федеральный проект “Термоядерные и плазменные технологии” и обеспечить безусловное выполнение запланированных в нём мероприятий. Отдельная признательность одного из авторов (В.И.И.) – С.В. Мирнову и Л.Н. Химченко за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Jassby D.* Fusion confusion. <https://beyondnuclearinternational.org/2019/05/12/fusion-confusion/>
2. *Мирнов С.В.* Токамаки: триумф или поражение? // *Природа*. 1999. № 11. С. 10–22; № 12. С. 26–37.
3. *Велихов Е.П., Смирнов В.П.* Состояние исследований и перспективы термоядерной энергетике // *Вестник РАН*. 2006. № 5. С. 419–426.
4. *Стрелков В.С.* Термоядерная энергетика: 60 лет исследований. Что дальше? // *Вопросы атомной науки и техники. Серия “Термоядерный синтез”*. 2016. № 1. С. 5–14.
5. *Ильгисонис В.И.* Ключи к дверям будущего: отраслевая наука как фундамент национальной безопасности // *Вестник Атомпрома*. 2020. № 1. С. 54–61.
6. *Шафранов В.Д.* Первый период истории термоядерных исследований в Курчатовском институте // *УФН*. 2001. № 8. С. 877–886.
7. *Ильгисонис В.И.* Классические задачи физики горячей плазмы. М.: Изд. дом МЭИ, 2015.
8. *Keilhacker M., Gibson A., Gormezano C., Rebut P.H.* The scientific success of JET // *Nucl. Fusion*. 2001. V. 41. № 12. P. 1925–1966.
9. *Progress in the ITER Physics Basis / Ed. K. Ikeda // Nucl. Fusion*. 2007. V. 47. № 6.
10. *Politzer P.A.* The Bootstrap Current and Neutral Beam Current Drive in DIII-D // *Fusion Science and Technology*. 2005. V. 48. № 2. P. 1170–1177.
11. *Mirnov S.V.* Tokamak evolution and view to future // *Nucl. Fusion*. 2019. V. 59. № 1. P. 015001.
12. *Захаров Л.Е.* Виталий Д. Шафранов и необходимые условия для термоядерного синтеза // *Физика плазмы*. 2019. № 12. С. 1059–1064.
13. *Сахаров А.Д.* Воспоминания. В 2-х томах. Т. 1 / Редакторы-составители Е. Холмогорова, Ю. Шиханович. М.: Права человека, 1996.
14. *Велихов Е.П., Азизов Э.А., Алексеев П.Н. и др.* Концепция “зелёной” ядерной энергетике // *ВАНТ. Серия “Термоядерный синтез”*. 2013. № 1. С. 5–16.
15. *Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Азизов Э.А. и др.* Гибридный термоядерный реактор для производства ядерного горючего с минимальным радиоактивным загрязнением топливного цикла // *ВАНТ. Серия “Термоядерный синтез”*. 2014. № 4. С. 5–12.
16. *Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И. и др.* Ядерная энергетическая система с реакторами деления и синтеза – стратегический ориентир развития отрасли // *ВАНТ. Серия “Термоядерный синтез”*. 2017. № 4. С. 5–13.
17. *Велихов Е.П., Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И. и др.* Эволюционное развитие атомной энергетике в направлении крупномасштабной ядерной энергетической системы с реакторами деления и синтеза // *Энергетическая политика*. 2017. № 3. С. 12–20.
18. *Орлов В.В., Пономарёв Л.И.* Ядерные проблемы термоядерной энергетике // *Атомная энергия*. 2018. № 2. С. 105–113.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

© 2021 г. А. В. Дуб^{a,*}, А. И. Рудской^{b,**}

^a Акционерное общество “Наука и инновации” Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”, Москва, Россия

^b Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: AlVDub@rosatom.ru

**E-mail: rector@spbstu.ru

Поступила в редакцию 15.01.2021 г.
После доработки 20.01.2021 г.
Принята к публикации 21.02.2021 г.

В статье, подготовленной по материалам доклада, представленного на Общем собрании членов РАН 8 декабря 2020 г., формулируются новые материаловедческие и технологические подходы для обеспечения безопасности и экономической эффективности эксплуатации ядерно-энергетических установок нового поколения. Подчеркивается важность комплементарного применения многоуровневого моделирования, проведения ускоренных радиационных испытаний свойств материалов и изделий в обоснование конструкторских решений, а также необходимость создания перспективной нормативной базы и стандартов для внедрения новых методов конструирования материалов и производственных технологий. Отмечено, что ряд перспективных проектов по разработке новых материалов успешно реализуется в кооперации с институтами РАН. Перечислены основные направления сотрудничества отраслевых НИИ и академических институтов в интересах ядерной энергетики.

Ключевые слова: отбор кандидатных материалов, компьютерное материаловедение, имитационные испытания, реакторные испытания.

DOI: 10.31857/S0869587321050078

Стратегия развития Госкорпорации “Росатом” предполагает активное освоение в ближайшие 10 лет новых технологий по ряду крупных направлений: традиционные водо-водяные энергетиче-

ские реакторы (ВВЭР) и перспективные ВВЭР-С и ВВЭР-СКД, реакторы на быстрых нейтронах БН-1200 и БРЕСТ, жидкосольевые реакторы на расплавах солей, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы, атомные станции малой мощности, конструкционные материалы топлива, аддитивные и другие технологии [1]. Успех/эффективность развития каждого из этих технологических направлений связан с выходом за традиционные базы данных по материалам и необходимостью исследования механизмов их поведения в новых условиях [2]. Неслучайно Научно-технический совет Госкорпорации “Росатом” принял решение выделить отдельную материаловедческую программу, одна из задач которой состоит в том, чтобы существенно сократить сроки разработки новых материалов для их использования в перспективных проектах. Уже перед началом реализации этой программы количество исходных кандидатных материалов превышало сотню. Возможность работы с ними в обозримое время требовала новых подходов. С этой целью было организовано взаимодействие предприятий “Росатома” с институтами РАН и уни-



ДУБ Алексей Владимирович – доктор технических наук, профессор, первый заместитель генерального директора АО “Наука и инновации”, научный руководитель приоритетного направления научно-технологического развития Госкорпорации “Росатом” “Материалы и технологии”. РУДСКОЙ Андрей Иванович – академик РАН, ректор СПбПУ Петра Великого.

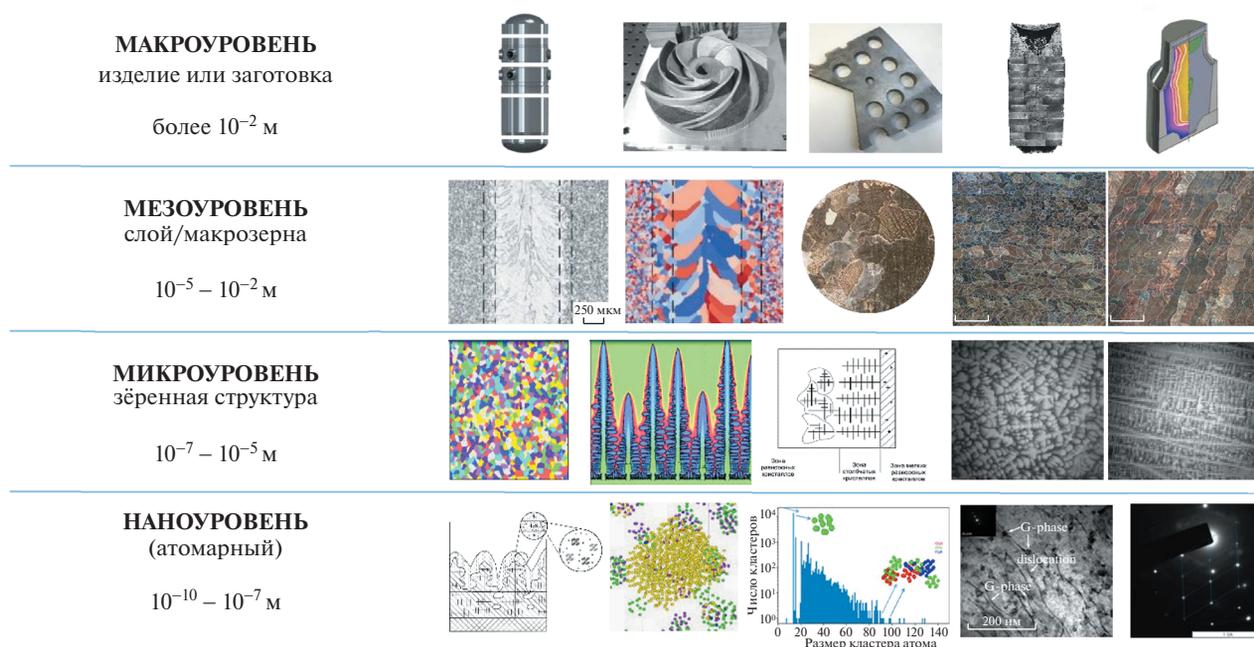


Рис. 1. Генезис материалов – взаимосвязь структурных уровней

верситетами. Академия наук тесно вплетена во все проекты, связанные с атомным материаловедением.

Подчеркнём, что основные подходы к новым материалам, использовавшиеся в атомной отрасли на рубеже 1970–1980-х годов, фактически исчерпаны. Конструкционные материалы, закладываемые в новые энергетические технологии, должны обеспечивать работоспособность реакторов при высоком давлении, высоких температурах (более 650°C) и высоких повреждающих дозах (более 140 сна^1) [2]. Один из базовых подходов состоит в том, чтобы при материаловедческом обосновании с самого начала технологической цепочки закладывалась связь микро-, мезо- и макропараметров структуры новых материалов, с одной стороны, с их энергетическим состоянием и локальным взаимодействием в условиях эксплуатации – с другой (рис. 1) [3].

Концепция отбора кандидатных материалов представляет собой пирамиду, состоящую из нескольких уровней: компьютерное материаловедение на первом этапе [3–8], ускоренные имитационные испытания на этапе оценки кандидатных материалов [9–14] и, утверждённый Ростехнадзором полный набор исследований, включая реакторные испытания, для окончательного выбора с обоснованием. Чтобы в ограниченное время достичь нужных результатов, работа с подбором

кандидатных материалов должна трансформироваться в стандартные процедуры: расчётные коды, программы и методики.

Основная задача компьютерного материаловедения – отбор кандидатных материалов из большого числа вариантов. Инструментом здесь служат теория функционала плотности, динамическая теория среднего поля и квантовая химия. Вычислительные инструменты предполагают использование методов машинного обучения для ускоренного поиска материалов с заданными свойствами и верификацию по базам данных [3–8]. Так, нами проведена оценка более 550 тыс. вариантов различных сплавов, которая показала, что многокомпонентные (более 4 элементов) ферритно-мартенситные стали – основной материал для изготовления реакторных корпусов – демонстрируют одновременно существенное увеличение стабильности и пластичности без значительной деградации механических свойств (рис. 2).

Следует отметить, что работы в области компьютерного материаловедения собираются в единой Базе данных по свойствам материалов Госкорпорации “Росатом”, которая формируется как отдельный проект.

Для ускоренных имитационных исследований радиационной стойкости конструкционных материалов используется ускоритель заряженных частиц “Тандем” (Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского) – новая и уникальная для России установка, лучшая в своём классе, позволяющая получить результат быстрее, чем в реакторных экспериментах. Ускорители давно

¹ Смещение на атом (сна) – характеристика, отражающая степень воздействия радиации на конструкционные материалы.

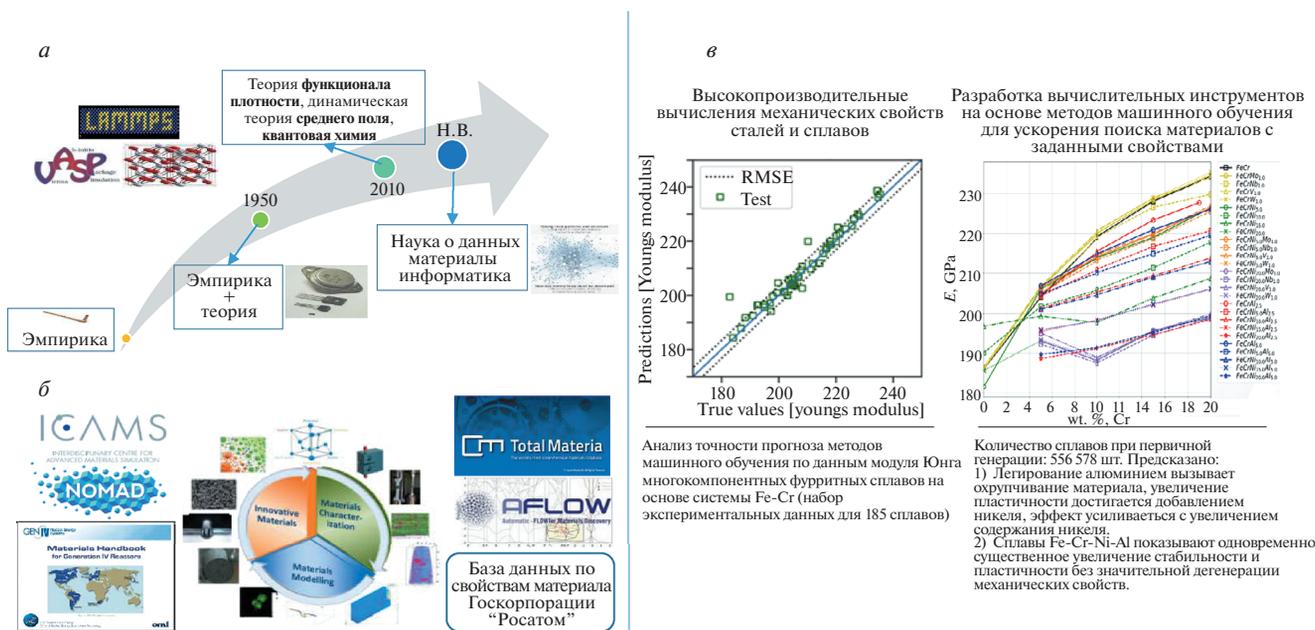


Рис. 2. Роль компьютерного материаловедения в разработке методик отбора кандидатных материалов (а); проекты, центры и базы данных в области компьютерного материаловедения (б); подбор материалов с наилучшими свойствами (модуль Юнга) (в)

применялись для реакторного материаловедения [9–14]. Вопрос состоял в том, чтобы эту методику использовать как стандарт. На специальных типах образцов, облучённых в ускорителе, нам удалось продемонстрировать механизмы и воздействие разных видов облучения не только на структуру материала, но и на их свойства. При этом дозовая нагрузка на образец достигала 200 сна, имитируя деградацию микроструктуры так же, как при реакторном облучении. Однако в условиях реакторных испытаний этот процесс занял бы более 5–10 лет, при облучении на ускорителе – часы.

Изучались все типы металлических материалов для атомной энергетики (рис. 3, 4). На рисунке 4 представлена схема, которая демонстрирует, каким образом можно перейти от ускоренных методов облучения к измерению микротвёрдости и микроиндентированию, провести пересчёт в механические свойства и определить критическую температуру для перехода из вязкого состояния в хрупкое, а также макропоказатели трещиностойкости и при этом подтвердить, что именно такие образцы являются представительными для конкретного типа и класса стали. Важнейший итог этих работ – создание стандарта испытаний на основе предложенной методики, позволившей за счёт непосредственного измерения структурно-чувствительных параметров материала определить влияние различных температур облучения на радиационную стойкость, а следовательно, и на ресурс материала.

Заключительная часть – ускоренные реакторные испытания. Госкорпорация “Росатом” обладает развитой экспериментальной базой, значительную часть которой составляют действующие исследовательские ядерные установки. Совместная работа институтов Госкорпорации “Росатом” и НИЦ “Курчатовский институт” показала возможность проведения ускоренных реакторных испытаний с увеличением дозы облучения образцов более чем в 10 раз. При этом учитывалось поведение внешней окружающей среды.

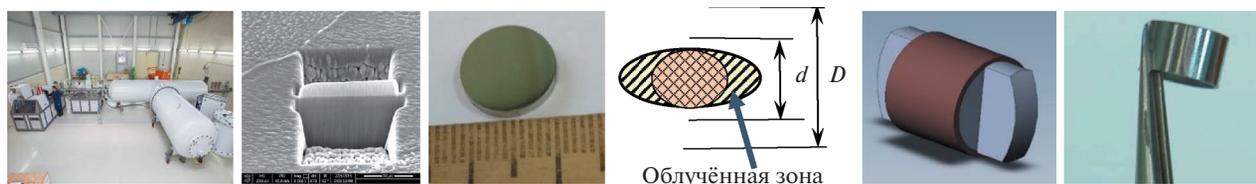
Таким образом, всего за два года (!) был отобран основной материал для внутрикорпусных устройств перспективного реактора ВВЭР-СКД, который сейчас проходит реакторные испытания. При этом осуществлён последовательный отбор сплава сначала по критерию поведения при радиационном распухании, затем при коррозионном растрескивании в водной среде сверхвысоких параметров, либо при водородном охрупчивании и тепловом старении. Сопротивление хрупкому разрушению и коррозионная прочность обеспечены после ионного облучения до 200 сна, что соответствует запредельному сроку службы материала в реальных условиях.

Получены образцы перспективного конструкционного материала толерантного топлива на основе карбида кремния. Реализован полный цикл его производства от компьютерного моделирования до экспериментальных изделий, освоен опыт работы с волокнами из SiC. Фактически создана новая отрасль атомной энергетики.

Ускоритель ионов
TANDETRON (ФЭИ)

Для материалов крупногабаритных
элементов конструкций

Для материалов тонкостенных трубок
(оболочек твэлов)



Механизмы деградации:

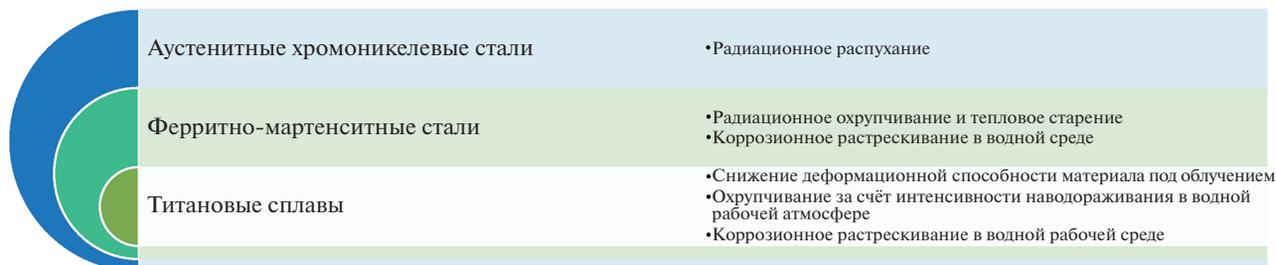


Рис. 3. Ускоренные имитационные исследования радиационной повреждаемости конструкционных материалов

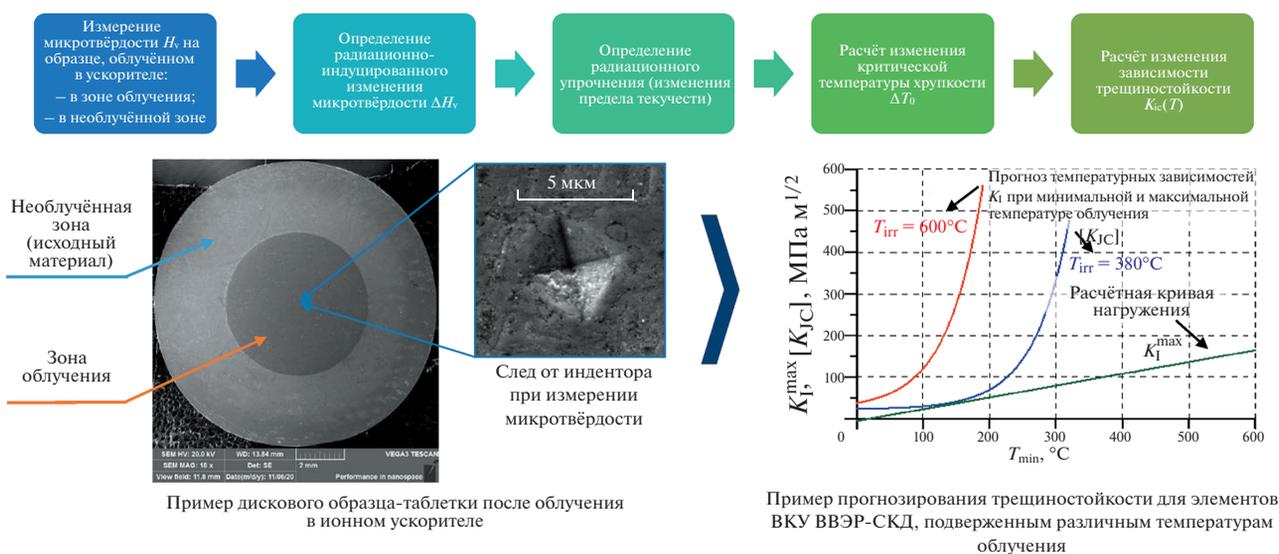


Рис. 4. Прогнозирование сопротивления хрупкому разрушению (трещиностойкости) конструкционных материалов по результатам испытаний образцов, облучённых в ионном ускорителе

Подобраны композиции жаропрочных материалов, упрочнение которых обеспечивается за счёт выделения наноразмерных фаз, что позволяет увеличить сроки их эксплуатации при обычных температурах в 100 раз, либо поднять температуру эксплуатации установки на 50°C . Кроме того, показано, что в ферритно-мартенситных сталях за счёт радиационного воздействия появляются высокодисперсные наноразмерные фазы, которые не выделяются при обычных условиях, что приводит к равномерному упрочнению материала. При этом наноразмерные фазы образуются при

относительно высоких температурах (более $400\text{--}500^\circ\text{C}$). Иными словами, создаётся новая радиационная технология упрочнения сплавов ферритно-мартенситного класса, которые можно использовать и в обычных условиях. Ещё одно важное направление – селективное удаление атомов под действием облучения ускоренными частицами, при котором инициируется процесс замены атомов исходного химического соединения на новые атомы, содержащиеся в ионном пучке.

В настоящее время мы располагаем *аддитивными технологиями* – высокопроизводительной

системой селективного лазерного плавления металлических порошков (3D-принтер по металлу), уникальным с точки зрения материаловедения оборудованием российского производства. В относительно малом объёме жидкого расплава концентрируется большая энергия за счёт лазерного или электронного луча. Поэтому без рассеяния или поглощения можно обеспечить целенаправленное воздействие на микроструктуру металла, начиная с формирования первичной кристаллической структуры, за счёт модуляции параметров пучкового излучения, которое помимо теплового воздействия генерирует ультразвуковые колебания.

Идёт поиск конструкционных материалов для одного из инновационных проектов атомной энергетики – жидкосолевого реактора. Топливо в таких установках будут растворять в расплаве солей FLiBe. Но в перспективе реактор могут перевести на более эффективную композицию ФЛИНАК (смесь фторидов лития, натрия и калия LiF-NaF-KF), которая при всей агрессивности способна растворять большее количество минорных актинидов. Уже подобран ряд материалов, подтверждающих возможность обеспечивать скорость их коррозии менее 30 мкм/год после 100 ч эксплуатации при 650°C в среде ФЛИНАК.

Новые условия эксплуатации и механизмы поведения материалов требуют проведения совместных с институтами РАН фундаментальных работ в области атомного материаловедения. К ним в первую очередь относятся работы:

- по изучению сочетания первопринципного моделирования свойств материалов на основе квантомеханических расчётов с использованием функционала плотности и последующего молекулярного моделирования на основе машинного обучения с использованием результатов этих расчётов на мезо- и макроуровне;
- по исследованию природы радиационного повреждения материалов при воздействии нейтронов и заряженных частиц;
- по изучению кинетических явлений при фазовых переходах и детальному исследованию динамики кристаллизации металлов с возможностью воздействия на неё синхротронным, лазерным и другими видами излучений.

Большой объём фундаментальных исследований будет выполняться в академических институтах. Можно сказать, что научные центры и инсти-

туты РАН играют важнейшую роль в разработке новых материалов для атомной энергетики.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ашурко Ю.М.* Перспективные реакторные технологии 4-го поколения и их развитие в рамках Международного форума “Поколение IV” // Сборник докладов научно-технической конференции “Теплофизика реакторов нового поколения” (Теплофизика-2018). 16–18 мая 2018 г., Обнинск. Обнинск: ГНЦ РФ–ФЭИ, 2018. С. 22–30.
2. Structural materials for generation IV nuclear reactors / By ed. P. Yvon. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2017.
3. *Yanilkin A.V., Krasnikov V.S., Kuksin A.Yu., Mayer A.E.* Dynamics and kinetics of dislocations in Al and Al–Cu alloy under dynamic loading // International Journal of Plasticity. 2014. V. 55. P. 94–107.
4. *Wen C., Zhang Y., Wang C. et al.* Machine learning assisted design of high entropy alloys with desired property // Acta Materialia. 2019. V. 170. P. 109–117.
5. *Jurafsky D., Martin J.H.* Speech and language processing. International Edition, 2000.
6. *Tesauro G.* Temporal difference learning and TD-Gammon // Communications of the ACM. 1995. V. 38. № 3. P. 58–68.
7. *Li Z., Kermod J., De Vita A.* Molecular dynamics with on-the-y machine learning of quantum-mechanical forces // Physical review letters. 2015. V. 114. № 9. P. 096405.
8. *Behler J.* Representing potential energy surfaces by high-dimensional neural network potentials // Journal of Physics: Condensed Matter. 2014. V. 26. № 18. P. 183001.
9. Accelerator simulation and theoretical modelling of radiation effects in structural materials. IAEA Nuclear Energy Series NF-T-2.2. Vienna, 2018.
10. *Gary S.* Was Fundamentals of Radiation Materials Science. Metals and Alloys. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
11. *Taller S., Jiao Z., Field K.G., Was G.* Emulation of fast reactor irradiated T91 using dual ion beam irradiation // Journal of Nuclear Materials. 2019. V. 527. P. 151831.
12. *Taller S., Van Coevering G., Wirth B., Was G.* Predicting structural material degradation in advanced nuclear reactors with ion irradiation // Scientific Reports. 2021. V. 11. № 1. P. 2949.
13. *Was G.S., Jiao Z., Getto E. et al.* Emulation of reactor irradiation damage using ion beams // Scripta Materialia. 2014. V. 88. P. 33–36.
14. *Zinkle S.J., Snead L.L.* Opportunities and limitations for ion beams in radiation effects studies: Bridging critical gaps between charged particle and neutron irradiations // Scripta Materialia. 2018. V. 143. P. 154–160.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН
“75 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ. ВКЛАД АКАДЕМИИ НАУК”

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

© 2021 г. Н. Н. Пономарёв-Степной

Акционерное общество “Концерн Росэнергоатом”, Москва, Россия

E-mail: niknik-28@mail.ru

Поступила в редакцию 09.02.2021 г.

После доработки 15.02.2021 г.

Принята к публикации 22.02.2021 г.

Статья, подготовленная по материалам доклада на Общем собрании членов РАН 8 декабря 2020 г., базируется на исследованиях, выполнявшихся в нашей стране с 1970-х годов по программе “Водородная энергетика”, которая координировалась Комиссией по водородной энергетике АН СССР. Работы шли в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова в тесной кооперации с исследовательскими, конструкторскими, технологическими и промышленными предприятиями Министерства среднего машиностроения, общего машиностроения, энергетике, химической промышленности, чёрной металлургии, авиационной промышленности и Академии наук СССР. Концепция водородной энергетике с атомным производством водорода получила название “атомно-водородная энергетика”. Актуальность этой проблемы сегодня и имеющийся задел исследований и технологических разработок открывают путь для реализации в нашей стране атомно-водородной энергетике, признанной приоритетным направлением научно-технологического развития Госкорпорации “Росатом”.

Ключевые слова: водород, производство и использование водорода, атомно-водородная энергетика, безопасность водородной энергетике, международное сотрудничество, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы с гелиевым теплоносителем, атомные энерготехнологические станции с ВТГР.

DOI: 10.31857/S0869587321050194

Рост энергопотребления и тренд на декарбонизацию стимулируют становление нового технологического уклада – водородной энергетике, подразумевающей производство и потребление водорода в качестве энергоносителя, накопителя энергии и компонента промышленных технологий.

Анализ динамики глобального энергопотребления и соотношения удельного потребления

первичной энергии развитых и развивающихся стран показывает существенное изменение этого соотношения за последние полвека [1] (рис. 1). Примерно в середине прошлого столетия удельное потребление первичной энергии в развитых и развивающихся странах отличалось более чем в 20 раз. В 1990-х годах эта разница сократилась до 10 раз. Происходит сближение уровня энергопотребления в разных странах мира, и эта тенденция будет сохраняться. Выравнивание идёт не за счёт перетока энергии из развитых стран, а путём опережающего наращивания энергопотребления развивающимися странами. При сохранении этого тренда с учётом роста населения глобальные потребности в энергии могут вырасти в 2–3 раза к середине века. Наряду с наращиванием использования первичных энергетических ресурсов следует ожидать изменения технологического уклада. Одним из признаков таких изменений станет использование водорода как более приспособленного источника энергии по сравнению с электричеством для энергоснабжения рассредоточенных



ПОНОМАРЁВ-СТЕПНОЙ Николай Николаевич – академик РАН, научный консультант генерального директора АО “Концерн Росэнергоатом”.

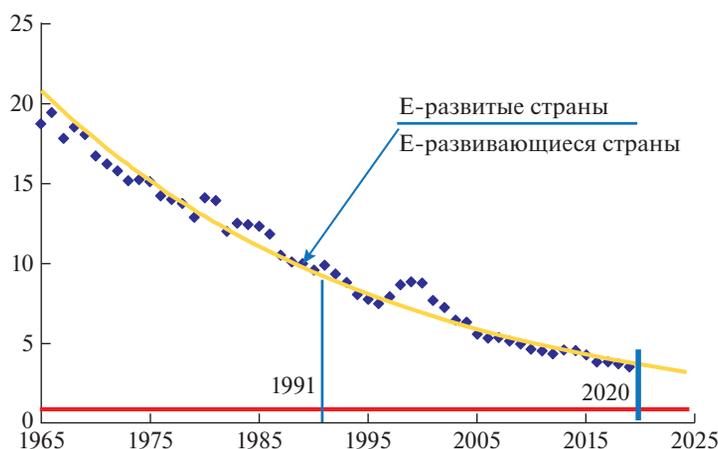


Рис. 1. Отношение удельного потребления энергии в развитых и развивающихся странах

потребителей. Замещение водородом углеродных топлив обеспечит выполнение требований декарбонизации. Наиболее эффективной эта тенденция может оказаться для экономики развивающихся стран.

Масштабное развитие возобновляемых источников энергии (ВИЭ) — солнца, ветра — с учётом характерных для них низких коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ) требует сочетания с накопителями энергии. Водород как накопитель энергии — наиболее эффективное средство для выполнения этих задач. Причём интересен он в сочетании с АЭС, требования к регулированию мощности которых будут со временем ужесточаться.

Выполнение требований декарбонизации особенно важно для транспортных систем — автомобилей, автокаров, судов, поездов, авиации и ракет. Здесь водород будет конкурировать с аккумуляторами электроэнергии, и его использование может оказаться предпочтительным. Кроме того, будет возрастать роль водорода как химического элемента в промышленных технологиях — нефтепереработке, нефтехимической и химической промышленности (метанол, этилен, аммиак, удобрения, полимеры), металлургии (прямое восстановление и получение чистых металлов).

Таким образом, водород и его переделы — востребованный товар. При этом ключевой проблемой водородной энергетики остаётся экологически чистое производство водорода с использованием таких же безуглеродных источников энергии. Применение атомной энергии не только для производства электроэнергии и тепла, но и водорода кардинально решает данную проблему.

БАЗА ЗНАНИЙ АТОМНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Основа технологий, необходимых для водородной энергетики, была заложена на первой стадии Атомного проекта. Уже в 1947 г. начался поиск путей применения реакторов для энергетических целей [1]. В 1947–1948 гг. специалисты представили первые предложения по использованию высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) с гелиевым теплоносителем для АЭС, флота и авиации. С 1950 г. начались систематические исследования по созданию атомных самолётов, ядерных ракетных двигателей, а затем и космических ядерных установок [2, 3]. Для атомных самолётов были проработаны прямоточные и турбореактивные двигатели с высокотемпературными реакторами для нагрева воздуха. В середине 1950-х годов специалисты приступили к созданию ядерных ракетных двигателей (ЯРД) с использованием в качестве рабочего тела водорода. Созданы реакторы и стенды для испытаний тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок реакторов ЯРД — ИГР и ИВГ-1, а также стендовый вариант реактора ЯРД минимальных размеров — ИРГИТ (рис. 2). При испытаниях на ИГР, ИВГ-1 и ИРГИТе были получены важные результаты: плотность тепловыделения в твэ-лах достигала 30 кВт/см^3 , температура нагрева водорода — до 3100 К , суммарное время испытаний многих тепловыделяющих сборок составляло 4000 с . Реактор ИРГИТ работал на мощности 90 МВт при температуре водорода 3000 К . США, разработав и испытав более десяти полноразмерных реакторов, не смогли получить таких параметров.

В начале 1960-х годов были развёрнуты работы по прямому преобразованию тепловой энергии ядерного реактора в электричество для космических целей с использованием термоэлектриче-

ских и термоэмиссионных преобразователей. Эти реакторы прошли испытания на стендах и нашли применение в космических аппаратах.

Исследования выполнялись специалистами Института атомной энергии им. И.В. Курчатова (ныне – НИЦ “Курчатовский институт”) в кооперации с исследовательскими, конструкторскими, технологическими и промышленными предприятиями ряда министерств – среднего машиностроения, общего машиностроения, энергетики, химической промышленности, чёрной металлургии, авиационной промышленности и Академии наук СССР. Широко известна фотография “Три К” (И.В. Курчатов, С.П. Королёв, М.В. Келдыш), символизирующая сотрудничество атомной и космической отрасли с Академией наук, уникальные результаты которого могут пригодиться и сегодня при разработке технологий водородной энергетики.

С 1960-х годов в Курчатовском институте на основе анализа путей развития энергетики, структуры глобальной энергетики, топливных балансов и ресурсов топлива формулировалась стратегия долгосрочного развития атомной энергетики, её место в энергетике страны и мира и структура крупномасштабной атомной энергетики будущего. Была обоснована многокомпонентная структура атомной энергетики, включающая замкнутый топливный цикл с расширенным производством топлива в реакторах-бридерах (их ещё называют реакторами-размножителями), использование избыточного топлива, нарабатываемого бридерами в тепловых реакторах, расширение областей использования ядерной энергии помимо электричества.

В середине 1970-х годов по инициативе президента Академии наук СССР директора Института атомной энергии им. И.В. Курчатова академика А.П. Александрова совместно с рядом министерств и ведомств была разработана и принята программа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по широкому внедрению водородной энергетики в народное хозяйство [4–6]. Концепция водородной энергетики с атомным производством водорода получила название “атомно-водородная энергетика” [7]. Она предусматривала расширение использования ядерной энергетики для энергоёмких отраслей химической, металлургической, строительной, топливной промышленности, теплоснабжение распределённых потребителей с хемотермической передачей энергии и, конечно, крупномасштабное производство пресной воды.

Основываясь на опыте начальных этапов разработки высокотемпературных реакторов для специальных назначений и энергетики, были подготовлены проекты опытно-промышленных установок с высокотемпературными гелиевыми



Рис. 2. Реактор ИРГИТ

реакторами (ВГР-50, ВГ-400, ВГМ-200, МВГР-ГТ, ВТГР-10) в широком диапазоне мощностей, модульные и блочные конструкции, рассмотрены конструкции реакторов в металлическом и железобетонном корпусах. Проектно-конструкторские работы сопровождались экспериментально-стендовой отработкой технических решений и основного оборудования. С этой целью в институтах и конструкторских бюро была создана лабораторная и стендовая база. Особое внимание уде-

лялось исследованиям, разработке и испытаниям тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) на основе микротоплива, размещаемого в графитовой матрице. На опытно-промышленном производстве было изготовлено около 100 тыс. шаровых ТВЭЛов.

Для решения проблемы расширенного воспроизводства топлива рассматривались гелиевые бридеры с минимальным временем удвоения ядерного топлива. Выполнены проекты реакторов модульной и блочной концепции [8].

Разработки, связанные с созданием атомной энерготехнологической станции (АЭТС) с ВТГР, выполненные Курчатовским институтом, институтами и КБ Минсредмаша (ОКБМ, ПНИТИ, НИКИЭТ, ВНИПИЭТ и др.), Министерства химической промышленности СССР и Министерства чёрной металлургии СССР, послужили основой для принятия Постановления Совета министров СССР № 794-191 от 16 июля 1987 г. “О создании и внедрении в народное хозяйство атомных энерготехнологических комплексов на базе ВТГР” (Дмитровград, Кирово-Чепецк, Котлас, Новополюцк и Нижнекамск). База данных суммирована Курчатовским институтом в публикациях серии “Атомно-водородная энергетика и технология” [9] и в монографиях серии “Физико-технические проблемы ядерной энергетика”.

Наряду с созданием технологий атомного производства водорода, шли работы по различным направлениям его использования. Так, в рамках программы по водородной энергетике, КБ Туполева совместно с рядом НИИ и КБ авиационной промышленности создало Ту-155 – летающую лабораторию, использующую в качестве топлива жидкий водород. На Ту-155 был установлен экспериментальный турбореактивный двухконтурный двигатель НК-88, созданный под руководством академика Н.Д. Кузнецова. Топливный бак, вмещавший 17,5 м³ сжиженного газа, находился в хвостовой части фюзеляжа в постоянно продуваемом отсеке. Бак, трубопроводы и агрегаты топливного комплекса имели экранно-вакуумную изоляцию, обеспечивавшую заданные теплопритоки. Для обслуживания самолёта был разработан авиационный криогенный наземный комплекс, позволяющий проводить различные виды испытаний с использованием большого количества криогенной жидкости. Начиная с 1988 г. выполнено более 100 полётов, из них пять – на жидком водороде.

В 1973 г. в Тульском филиале ЦНИИчермета им. И.П. Бардина были созданы лаборатория по использованию атомной энергии в чёрной металлургии и лаборатория прямого получения железа в твёрдой фазе.

В 2001 г. АвтоВАЗ в сотрудничестве с Уральским электрохимическим комбинатом при уча-

стии РКК “Энергия” разработал водородомобиль “Антэл-1” на базе ВАЗ-2131 “Нива”.

В декабре 2003 г. стартовала Комплексная программа поисковых, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по водородной энергетике и топливным элементам, разработанная Российской академией наук и компанией “Норильский никель”, которая предусматривала кооперацию более чем 50 научно-исследовательских институтов РАН, Курчатовского института, Ракетно-космической корпорации “Энергия” им. С.П. Королёва, Исследовательского центра им. М.В. Келдыша, МГУ им. М.В. Ломоносова и других учреждений для производства конкурентоспособных энергетических установок с использованием водородных технологий.

МЕЖДУНАРОДНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО В ОБЛАСТИ ВТГР

В ходе разработки проектов высокотемпературных газовых реакторов большое внимание уделялось международному сотрудничеству с МАГАТЭ и взаимодействию с ведущими научными центрами и фирмами разных стран. Российские специалисты активно участвовали в мероприятиях Технической рабочей группы по газоохлаждаемым реакторам (ТРГ-ГР), которая была создана МАГАТЭ в 1978 г. для содействия обмену технической информацией, координации исследований и международного сотрудничества в области газоохлаждаемых реакторов.

Международный форум “Поколение IV” (МФП) – инициатива, которая объединяет 13 стран, ориентирующихся на развитие ядерно-энергетических технологий следующего поколения, – включает проект по базовым НИОКР ВТГР: топливо и топливный цикл; материалы; компьютерные методы, валидация и бенчмаркинг; производство водорода. Актуальность присоединения России к МФП в сфере высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов обуславливается решениями Госкорпорации “Росатом” о развитии нового стратегического направления “Водородная энергетика”, ключевым компонентом которого является крупномасштабное производство водорода на основе ВТГР для России и на экспорт. Обмен такой информацией будет способствовать расширению базы знаний по ВТГР, а также снижению технического риска и сроков при разработке водородных технологий в нашей стране.

Приведу несколько примеров успешного взаимодействия с ведущими научными центрами и энергетическими компаниями различных стран по вопросам ВТГР.

Одна из целевых задач проекта реактора HTR-Modul, реализуемого с 1988 г. в сотрудничестве с

Siemens-KWU/Interatom (Германия), – сократить объём активных систем защиты, используя присущие ВТГР свойства безопасности, в частности, устойчивость к авариям типа RIA (Reactivity Initiated Accident), при которых происходит неконтролируемое введение избыточной реактивности в активную зону из-за неисправности системы регулирования или других причин, и LOCA (Loss of Coolant Accident), когда происходит потеря теплоносителя при мгновенном разрыве трубопровода первого контура ядерной энергетической установки. HTR-Modul мощностью 200 МВт(т) предназначен для производства технологического тепла различных промышленных систем. Результаты этого сотрудничества нашли практическое применение при разработке технического проекта реакторной установки ВГМ мощностью 200 МВт(т), выполненного в 1992 г. с экспериментальной отработкой основного оборудования на гелиевых стендах.

К одним из наиболее продвинутых относится международный проект модульного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с прямым газотурбинным циклом ГТ-МГР мощностью 600 МВт, который разрабатывался с 1998 по 2012 г. совместными усилиями российских институтов и компании “General Atomics” (США) с участием “Framatome” (Франция) и “Fuji Electric” (Япония). В рамках международного сотрудничества удалось усовершенствовать ряд отечественных проектов ВТГР, восстановить кооперацию российских предприятий, восполнить компетенции по ключевым компонентам, включая расчётные коды. Технические решения ГТ-МГР были использованы при разработке проекта МГР-Т, предназначенного для генерации электроэнергии, тепла и водорода на базе четырёх модульных высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов единичной мощностью 600 МВт. Концептуальный проект и его экономическое обоснование завершены в 2004 г.

В 1998 г. южноафриканская энергетическая компания “Escom” выразила заинтересованность в кооперации с российскими специалистами по проекту модульного высокотемпературного реактора с шаровыми твэлами РВМР. В рамках двустороннего сотрудничества российской стороной были выполнены работы по концепции топлива ВТГР, технологиям изготовления и реакторным испытаниям шаровых твэлов. В НИЦ “Курчатовский институт” на критическом стенде “Астра” прошли экспериментальные исследования нейтронно-физических характеристик высокотемпературного газоохлаждаемого реактора с кольцевой активной зоной.

С 2002 г. совместно с научными центрами Комиссариата по атомной энергии Франции (СЕА) идут системные исследования быстрых реакторов

с гелиевым теплоносителем и областей неэлектрического применения газоохлаждаемых реакторов, в частности, изучены различные способы производства водорода и эффективность технологий атомно-водородной энергетики; рассмотрены технологии передачи тепла от реактора к комплексу по производству водорода; проанализированы вопросы безопасности, связанные с взаимным влиянием реактора и технологического производства.

Во исполнение решений Российско-Китайской подкомиссии по ядерным вопросам проходят регулярные встречи специалистов пекинского Института ядерно-энергетических технологий (INET) и российских организаций по сотрудничеству в сфере ВТГР. Стороны обмениваются мнениями и определяют приоритетные направления исследований в этой области.

МИРОВОЕ РАЗВИТИЕ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Государства – признанные технологические лидеры в разработке и внедрении технологий водородной энергетики, базируясь на обнадёживающих результатах фундаментальных и поисковых исследований, первых демонстрационных проектах, в 1990-е–начале 2000-х годов запустили в своих странах полномасштабные долгосрочные программы развития водородной энергетики. Такие национальные программы и/или зафиксированные меры поддержки этого направления сегодня имеют более 30 стран [10–14].

В 2020 г. Еврокомиссия разработала и представила на утверждение Европарламенту важнейший документ “Водородная стратегия для климатически нейтральной Европы” [15]. Согласно стратегии, на первом этапе (до 2024 г.) планируется установить в ЕС как минимум 6 ГВт генерирующих установок (электролизёров) с использованием ВИЭ. С 2025 по 2030 г. производство водорода планируется повысить до 10 млн т. Водород, по мнению Еврокомиссии, должен стать неотъемлемой частью интегрированной энергосистемы и применяться в отраслях, где электрификация на основе ВИЭ невозможна, дороже или менее эффективна, в частности, на транспорте и в промышленности.

Германия, весьма успешно разрабатывающая и экспортирующая технологии по производству водорода и технологии Power-to-X, при которых электрическая энергия используется для производства иных энергоносителей, например водорода, ставит перед собой задачу стать мировым лидером в данной области. Федеральное правительство этой страны оценивает потребность в водороде в 90–110 ТВт · ч к 2030 г. Для достижения таких показателей необходимо построить до

2030 г. генерирующие установки общей мощностью 5 ГВт, добавив к 2035–2040 гг. ещё 5 ГВт мощности.

В рамках так называемого “пакета будущего”, принятого коалиционным комитетом, инвестиции в водородную индустрию составят 9 млрд евро, из которых 2 млрд евро предусмотрены на проекты, реализуемые в рамках международного партнёрства.

К мерам стимулирования производства водорода относят также освобождение от пошлин электроэнергии, генерируемой солнечными и ветровыми электростанциями, и введение платы за выделяемый углекислый газ при использовании традиционных источников энергии. Немецкие компании начинают осуществлять масштабные инвестиции в создание водородных технологий, что привлекает к проблеме ещё больше внимания. В силу ограниченных возможностей использования электроэнергии из возобновляемых источников в среднесрочной и долгосрочной перспективе Германии придётся импортировать большие объёмы водорода. Здесь открываются многочисленные пути для сотрудничества со странами, обладающими богатым ресурсным потенциалом, к которым, несомненно, относится Россия. Некоторые международные проекты, например, построение транснациональной цепочки создания добавленной стоимости применительно к водороду, уже реализуются.

Координация программ по водородной энергетике осуществляется на межгосударственном уровне. Регулярно проводятся министерские встречи по водороду, на которых принимаются решения о содействии сотрудничеству в области водородных технологий. В итоговых документах подчёркивается, что водород, будучи важным компонентом широкого, безопасного, устойчивого и эффективного энергетического портфеля, может стать ключевым фактором энергетического развития и способствовать переходу к экологически чистой энергетике. Так, 28–29 июня 2019 г. на Саммите G-20 в Осаке (Япония) в совместном коммюнике подчёркнута важность использования водорода в качестве топлива, а также создания систем улавливания и хранения углерода [16].

В 2003 г. ведущие страны мира, включая Россию, образовали Международное партнёрство по водородной экономике (МПВЭ) для координации усилий и совместного решения проблем водородной энергетике. В программах стран – участниц МПВЭ, как правило, присутствуют три основных направления: производство водорода, обращение с водородом (транспортировка, хранение, безопасность, техническое регулирование) и конечное его использование (автомобили, локальное энергоснабжение, накопители энергии).

В январе 2017 г. на Всемирном экономическом форуме в Давосе был создан Совет по водородным технологиям (Hydrogen Council) – крупнейшее объединение нескольких десятков ведущих энергетических, транспортных, промышленных и инвестиционных компаний с единым и долгосрочным видением развития водородной экономики [17]. Его основная цель заключается в ускоренных инвестициях в систему водородной экономики, включая транспорт, промышленность, использование водорода, его производство и распределение. Суммарная рыночная капитализация этих компаний – более чем 1.15 трлн долл.

На Международной научной конференции “Атомэкспо” в мае 2019 г. в итоговых документах отмечено, что водородная энергетика может стать новым глобальным рынком для атомной отрасли. Работы в этой области необходимо вести комплексно, делая основную ставку на крупномасштабное производство водорода, создание инфраструктуры по его хранению, транспортировке и использованию, а также обеспечение водородной безопасности.

ВОДОРОД И ЕГО ПЕРЕДЕЛЫ – ВОСТРЕБОВАННЫЙ ТОВАР

Исключительные свойства водорода как энергоносителя и компонента различных технологических процессов раскрывают перспективу его применения в различных областях энергетике, на транспорте и в промышленности. Если раньше потребителей энергии привлекали в основном его энергоёмкость, способность к хранению и распределению, то сейчас и на перспективу ключевым фактором становится его экологическая чистота и возможность декарбонизировать транспорт, химическую, нефтехимическую, металлургическую промышленность и коммунальный сектор. Водород сегодня рассматривается различными государствами и фирмами как ключевой энергоноситель будущего, перспективный товар. Сегодня потребление водорода в мире составляет около 70 млн т/год. Крупнейшие потребители (до 90% общего объёма) – химическая и нефтеперерабатывающая отрасли промышленности. Но это в основном “самодельный” водород, производимый с выбросами в атмосферу CO₂. В ближайшие десятилетия ожидается резкий рост потребления водорода в связи с переходом базовых отраслей промышленности на новые безуглеродные технологии и развитием экологически чистого транспорта с учётом требований сокращения углеродных загрязнений атмосферы. Наибольший вклад в рост мирового спроса на водород следует ожидать от транспорта и систем рассредоточенного энергоснабжения при использовании водородных топливных элементов. При масштабном освоении технологий производства, транспор-

тировки и хранения водород может быть использован и для решения проблем энергетики: распределение энергии по секторам, регионам и как буфер-накопитель. Например, это аккумулялирование энергии в энергосистемах с неравномерным графиком нагрузок, особенно для АЭС, буфер-накопитель энергии в сочетании с ВИЭ, энергоснабжение локальных потребителей и дальнейшее теплоснабжение.

Оценки масштаба мировой потребности в водороде как на ближнем горизонте, так и на дальнюю перспективу весьма неоднозначны. Ориентируясь на детализированный анализ использования водорода для широкого круга пользователей, приведённый в работах [7, 16, 17] в качестве целевых ориентиров, можно утверждать, что к середине XXI в. мир будет потреблять 500 млн т водорода в год, что означает приблизительно восьмикратное увеличение потребностей в нём. Это составит около 20% доли в энергетическом балансе и обеспечит 25%-ный вклад в снижение выбросов CO₂. К 2030 г. основные потребители должны подтвердить на рынке масштаб спроса на водород. По нынешним оценкам, он будет составлять около 100 млн т водорода в год. Реализация такой программы внесёт весьма значительный вклад в снижение загрязняющих атмосферу выбросов. Одновременно это огромные привлекательные финансовые потоки и создание новых рабочих мест. Неслучайно водород воспринимается как весьма востребованный продукт будущего.

ПРОИЗВОДСТВО ВОДОРОДА – КЛЮЧЕВАЯ ПРОБЛЕМА ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Сырьевые ресурсы водорода практически исчерпаемы – вода и углеводороды. Но для выделения водорода из этих соединений необходимо затратить энергию. Экологическая чистота водорода определяется как технологией его выделения из воды и углеводородов, так и чистотой потребляемой энергии. Использование для этого атомной энергии и ВИЭ обеспечит экологическую чистоту и необходимые масштабы производства водорода из воды и углеводородов. В ближайшем будущем вклад в масштабное производство водорода с использованием углеводородного сырья будет основным. Однако экологические ограничения процесса паровой конверсии метана с выбросом продуктов сгорания в атмосферу стимулируют разработку и применение промышленных процессов с использованием воды и экологически чистых источников энергии – атомных реакторов и ВИЭ.

Разложение воды. Среди способов получения водорода из воды наибольший интерес в контексте атомно-водородной энергетики представляют электролиз и термохимические циклы.

Технология электролиза хорошо освоена. На всех российских АЭС применяются щелочные проточные электролизные установки СУЭ-20, HySTAT-A-1000D/30/10, СУЭ-20/G32, производящие водород для собственных нужд. В связи с ростом суточных и сезонных диспетчерских ограничений мощности рассматривается возможность повышения КИУМ за счёт электролизного производства водорода. Основной недостаток – низкая эффективность использования первичной энергии и высокая стоимость электролизного водорода, которая в несколько раз выше стоимости водорода, производимого традиционными промышленными методами паровой конверсии метана. В мире и в нашей стране проводятся исследования и разрабатываются технологии, нацеленные на повышение выхода водорода на кВт·ч затраченного электричества, снижение удельной стоимости электролизёров, и, что существенно, прорабатываются пути снижения цены потребляемой ими электроэнергии.

В Научно-производственном объединении “Центротех” (г. Новоуральск Свердловской обл.) разрабатывается матричный щелочной электролизёр без циркуляции электролита и драгметаллов на отечественных материалах и комплектующих [18]. Состав электролизного элемента аналогичен составу топливного элемента, что позволяет использовать единую производственную базу. Его показатели: энергопотребление – менее 4,5 кВт·ч/нм³, давление – до 250 бар, КПД – более 70%, ресурс – 60000 ч, диапазон изменения мощности – от 0 до 150%. Конструкция батареи электролизного элемента аналогична батарее электрохимического генератора. Электролизная установка производительностью до 1000 нм³/ч состоит из 5 модулей по 200 нм³/ч.

Высокотемпературный электролиз – это процесс электролиза, при котором часть энергии, необходимой для расщепления воды, вкладывается в виде высокотемпературного тепла в нагрев пара, делая процесс более эффективным. Проработана концепция стыковки высокотемпературного электролизёра с ВТГР, дающая суммарный КПД производства водорода из воды до 50%. Высокотемпературная часть тепла от реактора передаётся через высокотемпературный теплообменник к пару, перегревая его до 800°C. Часть тепла реактора с более низкой температурой преобразуется в электрическую энергию в газотурбинном или паротурбинном цикле. Для перегрева пара до 800°C гелий на выходе из реактора должен иметь температуру не ниже 900°C. Эффективность высокотемпературного электролиза зависит от цены электроэнергии и температуры потребляемого тепла.

В термохимическом процессе получения водорода используется цикл реакций с химически ак-

тивными соединениями, например, брома или йода в сернокислотном цикле. В 1990-е и нулевые годы в ведущих странах мира этому процессу уделялось внимание как технологии производства водорода из воды с использованием тепла ВТГР. Выбор оптимального процесса определяется рядом критериев, важнейшие среди них – термодинамическая эффективность цикла, кинетические характеристики отдельных реакций, доступность и стоимость реагентов, совместимость реагентов и конструкционных материалов, безопасность процесса, экологические соображения и, в конечном счёте, экономическая эффективность. Исследования показали, что получение высокой термодинамической эффективности (КПД = 50%) в производстве водорода требует работы основных агрегатов термохимического цикла при температуре около 900–1000°C и соответствующей температуры тепла на выходе из реактора. Надёжных решений к настоящему времени не предложено.

Разложение метана. Затраты энергии в реакции разложения метана составляют 37.4 кДж/моль, что в 6.5 раза меньше, чем при электролизе воды (242.8 кДж/моль). Это стимулирует поиск и разработку технологий производства водорода путём разложения метана.

Наиболее очевидный путь – *термическое разложение метана*. Исследования нацелены на создание экологически чистой, без выбросов CO₂, технологии каталитического пиролиза углеводородного газового сырья с получением водородсодержащего газа или чистого водорода и углеродного наноматериала в сочетании с атомным источником энергии. Если будут разработаны каталитические композиции, обеспечивающие эффективность процесса получения водородсодержащего газа в режиме низкотемпературного пиролиза метана при температурах 600–800°C, то можно использовать высокотемпературное тепло ВТГР, и эта технология переходит в разряд экологически чистых. Образующийся при пиролизе метана углерод рассматривается как ценный вторичный продукт.

Кинетические ограничения пиролиза метана становятся несущественными при температурах выше 1700 К, однако в этом случае для нагрева газа, при котором используют дуговой, искровой или микроволновый разряд, требуется электроэнергия, что увеличивает затраты первичной энергии в 2–3 раза.

В Исследовательском центре им. М.В. Келдыша на основе опыта создания и использования многоканальных плазменных конверторов проводятся работы по высокотемпературному плазменному термическому пиролизу метана, при котором наряду с водородом образуется ценный продукт – ацетилен. В многоканальном плазмен-

но-дуговом конверторе производится нагрев исходных продуктов до 1600–1900 К и затем вывод прореагировавших продуктов из зоны реакции. Отработанный ключевой элемент такого конвертора – трёхфазный электродуговой плазмотрон мощностью 1–2 МВт, продолжительность его работы – сотни часов.

Энергетическая цена получения водорода по ацетиленовому маршруту пиролиза достаточно велика, и экономические показатели производства водорода в этом случае улучшаются, если учесть производство другого ценного продукта – ацетилена.

При *плазменно-каталитическом пиролизе метана* необходимость снижения затрат энергии стимулирует исследования, связанные с влиянием плазменных образований при низких температурах нагрева газа вплоть до величин, достижимых в ВТГР при сохранении высокой удельной производительности и селективности. В конце 1990-х – начале 2000-х годов в Курчатовском институте были выполнены работы по разложению метана, стимулированному неравновесной плазмой в гомогенных и гетерогенных системах. Специалисты экспериментально подтвердили, что ускорение процесса термического разложения метана можно эффективно осуществить в плазме микроволновых разрядов при температурах 700–900 К. Было установлено, что разложение метана идёт почти целиком за счёт тепловой энергии нагретого газа или подводимой к газу в ходе процесса. Расход плазменной энергии при этом оказался относительно невелик. Плазма в данном случае выступала в роли, сходной с ролью традиционного катализатора, – эффект плазменного катализа. В этих экспериментах метан, подогретый до 500–600°C, обрабатывали плазмой импульсно-периодического микроволнового разряда. На выходе плазменного реактора основным компонентом в остаточном метане служил водород [29, 20]. Из анализа экспериментальных зависимостей следует, что конверсия происходит в основном за счёт тепловой энергии нагретого метана. Наиболее вероятный механизм, который объясняет результаты экспериментов, связан с образованием в газе под воздействием плазмы заряженных углеродных кластерных ионов, служащих активными центрами для осуществления процессов пиролиза. Эффект плазменного катализа был продемонстрирован и исследован не только для пиролиза метана, но и для паровой, а также парокислородной конверсии углеводородов [21].

Более 70% мирового промышленного крупнотоннажного производства водорода осуществляется путём *паровой конверсии метана* (ПКМ). Для сокращения выбросов CO₂ и экономии природного газа в технологии ПКМ предлагается использовать энергию высокотемпературных реакто-

ров. Для интеграции ВТГР и химико-технологической части проводятся исследования паровой и парокислородной адиабатической конверсии метана с температурой используемого тепла на начальном этапе 750°C и его повышением в перспективе до $850\text{--}900^{\circ}\text{C}$. При этом решаются проблемы утилизации CO_2 , повышения ресурса оборудования и использования отечественных катализаторов, адсорбентов и абсорбентов [22].

Химико-технологическая часть паровой конверсии включает систему очистки природного газа, смеситель очищенного природного газа и водяного пара, аппараты риформинга метана, системы рекуперации тепла, выделения CO_2 , обращения с отходами и др. При разработке головной АЭС рассматривается совмещение технологии паровой и парокислородной конверсии метана с относительно небольшим добавлением кислорода в паро-метановую смесь, что позволяет увеличить уровень температуры конверсионной смеси за счёт экзотермической реакции метана с кислородом и степень его конверсии. Очистка от CO_2 производится путём хемосорбционной очистки газа водным раствором метилдиэтанол-амина и последующей регенерации раствора. Далее конвертированный газ попадает в блок короткоциклового адсорбции для финальной очистки от примесей, откуда водород высокой чистоты ($\sim 99.99\%$) направляется в промежуточное хранилище или к потребителю, а сдувной газ (метан и водород со следовыми примесями) — для смешения с природным газом перед блоком сероочистки.

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ГЕЛИЕВЫЕ РЕАКТОРЫ – ПУТЬ К АТОМНО-ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Высокотемпературные реакторы с гелиевым теплоносителем — принципиально новый экологически чистый универсальный источник атомной энергии, уникальные свойства которого — генерация тепла с температурой до 1000°C и высокий уровень безопасности — определяют широкие возможности его использования для производства электроэнергии с высоким КПД и водорода, снабжения высокотемпературным теплом и электричеством, для технологических процессов в химической, нефтеперерабатывающей, металлургической и других отраслях промышленности, а также для опреснения воды. ВТГР — один из лидеров среди инновационных реакторов будущей ядерной энергетики [23].

В ВТГР в качестве замедлителя и отражателя выступает графит, а топливом служат микротвэлы — сердечники-микросферы из керамических композиций урана, плутония или тория, заключённые в контейнер многослойных керамических

покрытий. Сочетание в активной зоне теплоносителя гелия, графита и керамического топлива создаёт наиболее благоприятные условия для получения высоких температур, повышения безопасности и эффективности использования топлива. Микротвэлы обеспечивают достижение уникальных параметров реактора: высокие температуры нагрева теплоносителя, локализацию продуктов деления и ультравысокие выгорания, в 10 раз превышающие общепринятые в действующих установках. Дробление массы топливного сердечника на множество микрочастиц повышает надёжность и безопасность топлива. Высокая коррозионная стойкость многослойных керамических покрытий служит основанием для долговременного захоронения ОЯТ с топливом такого типа в геологических формациях без переработки. Увеличение числа защитных барьеров, дробление топлива и инертность теплоносителя — гелия — обеспечивают высокую радиационную безопасность.

Возможность получения в реакторах с гелиевым теплоносителем высокой температуры делает этот тип реактора наиболее перспективным для комплексного производства электроэнергии и технологического тепла [24].

Модульная компоновка ВТГР эффективна для малых и средних атомных станций с высоким уровнем внутренней безопасности и маневренностью, что важно при сооружении их в труднодоступных районах, странах с энергетикой небольшого масштаба и применении реакторов для технологий. Производство электроэнергии при использовании прямого газотурбинного цикла с КПД $\sim 50\%$ сокращает тепловое воздействие на окружающую среду и делает возможным создание сухих градирен.

Благодаря значительной теплоёмкости активной зоны, большому запасу до температуры разрушения и отрицательной обратной связи по температуре и мощности эти реакторы сохраняют устойчивость при авариях реактивностного типа. Они также не подвержены разрушению при авариях с потерей теплоносителя, что обеспечивается, наряду с запасом до температуры разрушения, специальной кольцевой конфигурацией активной зоны. Всё это гарантирует пассивный отвод остаточного тепла в окружающую среду без превышения элементами зоны допустимых температур при авариях с потерей теплоносителя.

В 1960-х годах были созданы первые экспериментальные установки с ВТГР: “Драгон” (Великобритания), “Пич-Боттом” (США) и “AVR” (ФРГ). В 1970-е годы построены и введены в эксплуатацию демонстрационные АЭС “FSV” (США) и ТНТР-300 (ФРГ). На стыке столетий введены в эксплуатацию опытные реакторы

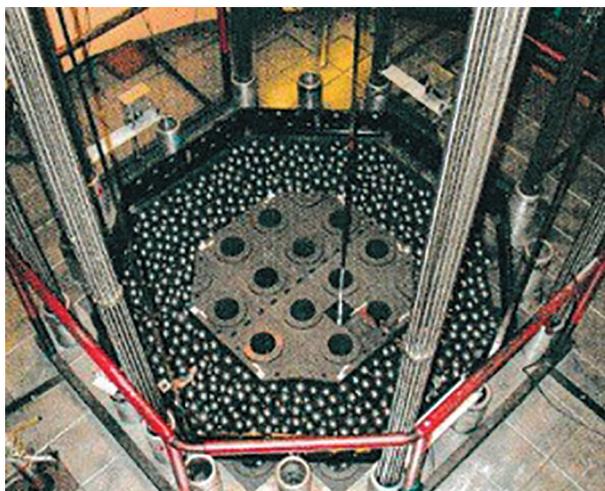


Рис. 3. Стенд “Астра”



Рис. 4. ВТГР-модуль

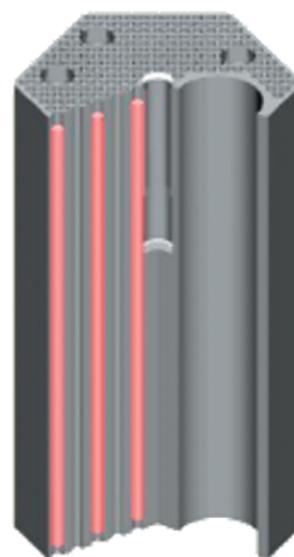


Рис. 5. Активная зона ВТГР

ВТГР в Японии и Китае. В Китае завершено строительство и ведутся пусковые работы демонстрационного двухреакторного энергоблока НТР-РМ с единым турбогенератором мощностью 200 МВт.

Россия имеет 45-летний опыт разработки ВТГР малой и средней мощности для производства электроэнергии и энерготехнологического применения. Для обоснования этих проектов создана экспериментальная и технологическая база, на которой проведён большой комплекс работ по исследованию нейтронной физики, теплогидравлики, термомеханики, массопереносу, технологии гелиевого теплоносителя, поведения топлива, в том числе под облучением, графита, конструкционных материалов, элементов конструкции и опытных образцов оборудования. Разработаны основы технологии топлива ВТГР, физики реакторов (рис. 3), конструкция модульного реактора (рис. 4, 5), высокотемпературные парогенераторы и теплообменники, циркуляторы с гелиевым теплоносителем, технология гелиевого теплоносителя, системы пассивной безопасности, расхолаживания, преобразования энергии, модели и коды.

Уровень готовности технологий позволяет в короткие сроки реализовать проект АЭС с ВТГР в России [25].

ВОДОРОД В СТРАТЕГИИ “РОСАТОМА”

Внедрение атомной энергии в электроэнергетику — наиболее очевидный шаг. В генерации электричества атомная энергия будет и далее наращивать свою долю, конкурируя с традиционным углеродным топливом и ВИЭ. Более трудная задача — использование атомной энергии в энергоёмких промышленных технологиях, производстве водорода как энергоносителя и

безуглеродного топлива, а также как восстановителя и компонента для различных технологических процессов. Актуальность этой задачи обусловлена необходимостью замены углеродов в этой сфере деятельности в объёмах, значительно превышающих их потребление в электроэнергетике. Потенциальный масштаб неэлектрического использования атомной энергии превосходит атомную электроэнергетику. Если ориентироваться на 10% потенциального рынка водорода,

то к середине века потребуется ввести АЭС с установленной тепловой мощностью ~50 ГВт. Это важно не только из-за ограниченности ресурсов углеводородов, но и вследствие требований декарбонизации. Необходимо отметить, что развитие атомно-водородной концепции будет также способствовать снижению риска ядерного распространения благодаря возможности поставок в развивающиеся страны энергоресурсов в виде водорода и его производных вместо ядерных реакторов и ядерных материалов.

Актуальность проблемы и имеющийся задел исследований и технологических разработок открывают путь для реализации в нашей стране атомно-водородной энергетики, признанной приоритетным направлением научно-технологического развития ГК «Росатом». В связи с этим Госкорпорация инициировала программу НИОКР «Разработка технологий атомно-водородной энергетики для крупномасштабного производства и потребления водорода», которая предусматривает:

- крупномасштабное централизованное производство водорода на атомных энерготехнологических станциях с ВТГР и конверсией природного газа, локальное распределённое производство, включая электролиз на АЭС;
- развитие инфраструктуры (хранение, транспортировка и потребление водорода);
- обоснование безопасности водородной энергетики на всех этапах жизненного цикла, включая производство, распределение и потребление водорода;
- интеграцию атомно-водородной энергетики в экономику страны и на международные рынки.

В результате НИОКР на внутреннем и зарубежном рынках должен появиться новый ключевой высокотехнологичный конкурентоспособный продукт с высокой добавленной стоимостью: водород, его переделы и технологии. Коммерциализация и экспорт этой продукции будет способствовать повышению устойчивости России на внешнем рынке. Потребуется кратный рост масштаба атомной энергетики, её доли в энергобалансе и создание новых рабочих мест в сфере высоких технологий. Использование водорода в энергетике, промышленности, коммунальном секторе и на транспорте сократит вредные углеводные выбросы.

Россия, располагая практически неограниченными сырьевыми ресурсами водорода и ядерного топлива и базой знаний по атомным и водородным технологиям, способна и должна занять лидирующие позиции в глобальном безуглеродном производстве водорода с ориентиром на 10% мирового рынка водорода.

Для крупномасштабного экологически чистого производства водорода — нового ключевого

продукта атомной отрасли — предлагается создать атомные энерготехнологические станции на основе модульных ВТГР и технологий конверсии природного газа (рис. 6). Каждая из них имеет промышленные и опытно-промышленные аналоги. Объединение этих разнородных технологий в едином атомном химико-технологическом комплексе потребует оптимальных схемных решений и компромисса при выборе физических, термодинамических, тепло-гидравлических, термомеханических параметров. При этом необходимо обеспечить экономическую конкурентоспособность производимого водорода, готовность головного блока АЭС к 2030 г. и гарантировать ядерную, радиационную и водородную безопасность.

На данной стадии проводятся проработки различных вариантов АЭС. В состав энерготехнологической станции входят четыре блока, в каждом — реакторная и химико-технологическая часть (см. рис. 6). Реакторная установка, расположенная в герметичной оболочке (контейнменте), состоит из модульного высокотемпературного реактора, гелиевого контура и теплообменника. Тепло из реакторной части передаётся через второй контур для нагрева сред технологической части водородного производства. В варианте паровой конверсии природного газа химико-технологическая часть включает систему подготовки природного газа, смеситель природного газа и водяного пара, аппараты риформинга метана, системы рекуперации тепла, выделения водорода, CO₂, обращения с отходами и др. Тепловая мощность АЭС — 4 × 200 МВт; температура гелия на выходе из реактора — 850°C; отпуск H₂ — 440 млн кг/год; энергозатраты — менее 2 кВт · ч на 1 кг H₂; потребление метана — 1700 млн нм³/год; утилизация CO₂ — 3.5 млн т/год.

Схема и параметры, в частности уровень температуры, весьма консервативны и это обусловлено намерением создать головной блок в нынешнем десятилетии. С целью повышения эффективности производства водорода предусмотрены НИОКР по улучшению параметров ВТГР (увеличение единичной мощности до 600 МВт, температуры — до 950°C) и химико-технологической части (паровая конверсия метана с повышенными температурами и варианты пиролиза метана).

Для локального малотоннажного производства водорода из воды наиболее подготовлена технология электролиза. Необходимую для этого электроэнергию можно получить на атомных электростанциях с возможным снижением тарифа при диспетчерском регулировании мощности. Электролизный водород, при производстве которого используется электроэнергия АЭС, экологически чист. Для атомной станции наличие

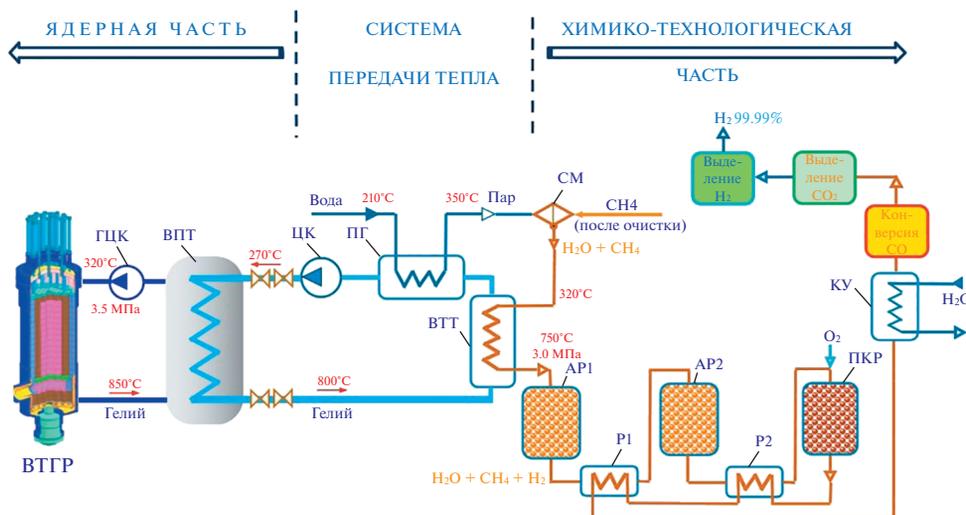


Рис. 6. Блок-схема химико-технологического комплекса АЭС с ВТГР

присоединённой нагрузки в виде электролизного производства водорода представляет интерес, так как при этом обеспечивается возможность её работы на постоянном уровне мощности, что важно при усиливающихся требованиях в маневренных режимах. Один из примеров: Кольская АЭС длительное время недоиспользует несколько сотен мегаватт своей мощности.

Предлагается создать электролизное производство водорода мегаваттного уровня в районе расположения Кольской АЭС в виде Центра компетенций по атомно-водородной энергетике. Его цели и задачи:

- отработка технологий повышения эффективности использования установленной мощности АЭС путём электролизного производства водорода и его применения в присоединённых высокотехнологичных производствах и для коммерческих поставок;
- демонстрация использования водорода в качестве накопителя и преобразователя энергии;
- наработка компетенций по электролизному производству водорода, безопасному обращению с ним, его хранению и доставке потребителю;
- тестирование электролизёров ведущих производителей;
- проработка предложений по использованию водорода в различных секторах экономики, например, в перспективной технологии прямого восстановления железа водородом в составе электрометаллургического комплекса по производству феррохрома нержавеющей стали на базе месторождения хромсодержащей руды “Сопчеозерское” (Мурманская обл., Кольский регион).

В структуру Центра наряду с электролизным комплексом войдут блоки обращения с водородом

(компримирование, ожижение, ёмкости хранения, газопроводная сеть), потребители.

АТОМНО-ВОДОРОДНЫЕ КЛАСТЕРЫ

Интеграцию водородной энергетики в экономику и энергетику страны ещё предстоит проанализировать. Но предварительные оценки показывают, что водородная энергетика, как и электроэнергетика или газовая промышленность, будет сочетать централизованное крупномасштабное производство и структуру магистрального распределения с локальным малотоннажным производством и доставкой водорода индивидуальным потребителям. Централизованное производство, наряду с обеспечением внутреннего рынка, будет нацелено на экспортные поставки водорода.

При определении площадок для размещения АЭС необходимо учитывать расположение относительно магистрального газопровода, возможности создания вблизи площадки энерготехнологических станций крупномасштабных подземных хранилищ водорода или метано-водородных смесей, возможности утилизации CO₂ и привязки к одной из действующей АЭС. С этой точки зрения рассматриваются западный и восточный атомно-водородные кластеры.

Для западного атомно-водородного кластера перспективны площадки Ленинградской и Смоленской АЭС. ЛАЭС расположена близко к северному магистральному газопроводу, рассчитанному на транспортировку 55 млрд м³ газа в год, при работе на проектной мощности он может ежегодно поставлять до 1 млн т водорода при его 20%-ном содержании в метано-водородной смеси. Для производства такого количества водорода установленная мощность АЭС должна

составлять ~2000 МВт(т). Вблизи Смоленской АЭС проходит газопровод “Ямал–Европа” производительностью 34.7 млрд м³ в год. В этом регионе расположены соляные бассейны, которые могут использоваться для сооружения подземных хранилищ природного газа, метано-водородной смеси и водорода, а также для утилизации CO₂. Транспортировку метано-водородной смеси можно осуществлять по газопроводу без существенного изменения его технической структуры. Для производства водорода в этом кластере потребуется построить АЭС мощностью ~1600 МВт(т).

На начальном этапе развития проекта до 2030 г. производство водорода объёмом до 0.1 млн т можно обеспечить электролизом воды с использованием мощностей действующих и строящихся энергоблоков на площадках Ленинградской и Смоленской АЭС.

Рост экономик стран Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) требует адекватного энергетического обеспечения этих стран. Удовлетворение растущего спроса с использованием традиционных углеродных ресурсов уже сейчас сталкивается с негативным влиянием на климат. Ведущие страны региона рассматривают развитие атомной энергетики как значимый элемент обеспечения энергетической и экологической безопасности. Россия может предложить своё участие в решении этой задачи путём создания на территории Дальнего Востока международного атомного энерготехнологического кластера, миссией которого будет промышленная демонстрация технологической возможности использования крупномасштабной ядерной энергетики, не имеющей топливных ресурсных ограничений, для долгосрочного обеспечения стран АТР экологически чистой электроэнергией и водородом.

В состав кластера войдёт атомная энерготехнологическая станция для экологически чистого производства водорода из воды и природного газа. Водород и его переделы будут поставляться на зарубежный рынок по трубопроводам или танкерами. Проект крупномасштабного экологически чистого производства водорода из природного газа представляет интерес для зарубежных партнёров и может разрабатываться как совместная инициатива. Сооружение на Дальнем Востоке атомных энерготехнологических комплексов, основанных на новейших российских технологиях, создаст условия для развития энергоёмкой промышленности, будет стимулировать приток высококвалифицированных специалистов, привлечёт внешних и внутренних инвесторов, откроет новые возможности для зарубежного бизнеса.

Работы по созданию атомно-водородных кластеров должны включать несколько сопутствующих пилотных проектов: обоснование транс-

портировки метано-водородных смесей по существующим магистральным и региональным газопроводам, разработка мембранных технологий и установок для выделения из смеси водорода для локальных потребителей, разработка модулей хранения смеси и водорода в соляных подземных хранилищах, утилизация и хранение CO₂. Эти проекты, помимо коммерческой составляющей поставок водорода с высокой добавленной стоимостью, обеспечат технологическое лидерство нашей страны на глобальном рынке экологически чистого водорода и технологий водородной энергетики.

БЕЗОПАСНОСТЬ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Многолетнее использование водорода в энергетике и промышленности показало степень его опасности, поэтому были разработаны правила обращения с водородом и требования, которые нужно соблюдать, чтобы избежать аварийных ситуаций. В программе по разработке технологий атомно-водородной энергетики системный анализ её функционирования и безопасности рассматривается как ключевой раздел, в котором предусмотрено проведение следующих работ:

- анализ, разработка и адаптация физико-математических моделей для задач безопасности водородной энергетики;
- численное моделирование и экспериментальное исследование поведения газообразных водородно-воздушных смесей в системах производства и потребления водорода;
- разработка концепции и инженерных методик для риск-информированного управления стойкостью и безопасностью водородной энергетики;
- анализ и совершенствование действующей нормативной документации для безопасности АЭС и инфраструктуры водородной энергетики.

В программе особое внимание уделено обоснованию безопасности атомно-водородных комплексов для производства водорода, в которых сочетаются ядерно-опасные объекты с водородными агрегатами.

Для иллюстрации развивающихся исследований по водородной безопасности на рисунке 7 показан ряд стендов, созданных во Всероссийском НИИ технической физики им. академика Е.А. Забабахина, результаты экспериментальных исследований и численного моделирования поведения водородно-воздушных смесей в системах производства и потребления водорода, выполненных совместно с НИЦ “Курчатовский институт”, Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики РАН и ООО “Кинтех Лаб”.



Рис. 7. Установки, созданные во Всероссийском НИИ технической физики им. академика Е.А. Забабахина, для исследований по водородной безопасности

ИНТЕГРАЦИЯ В ЭКОНОМИКУ СТРАНЫ И НА МЕЖДУНАРОДНЫЕ РЫНКИ

Развитие атомно-водородной энергетики возможно лишь при качественной её интеграции в экономику страны. Технологии атомно-водородной энергетики, водород и его переделы должны войти в различные области традиционных секторов энергетики, промышленности, транспорта, коммунального хозяйства и экономики в целом. Эта работа требует кооперации, партнёрства с различными структурами как в нашей стране, так и за рубежом. Необходим диалог и сотрудничество с такими корпорациями, как “Газпром”, “Роснефть”, компаниями химической промышленности и металлургии. И, безусловно, нужны государственная поддержка этого направления, стимулирование различными льготами, подготовка кадров.

В ближайшую пятилетку (2020–2024 гг.) необходимо обеспечить проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по производству водорода, созданию инфраструктуры безопасного обращения с ним на всех этапах жизненного цикла и во всех сферах его производства, а также хранения, транспортировки и потребления. Нужно разработать проектную документацию с испытанием опытно-промышленных модулей основных компонентов производства и потребления водорода. На этом этапе будут реализовываться пилотные проекты. Среди них – уже упоминавшийся Центр компетенций по атомно-водородной энергетике на Кольской АЭС, который нацелен на отработку технологий повышения эффективности использования установленной мощности АЭС в маневренных режимах путём электролизного производства водорода, его использования в присоеди-

нённых высокотехнологичных производствах и для коммерческих поставок. Как одно из направлений, связанных с применением водорода в различных секторах экономики, рассматривается предложение по технологии прямого восстановления железа водородом.

В 2023 г. на Сахалине планируется запустить поезд на водородных элементах. Не ограничиваясь производством водорода для заправки поезда, прорабатывается последующее применение водорода в других сферах (автомобильный транспорт, бункеровка судов, сфера ЖКХ), а также его поставка на экспорт. Для этого пилотного проекта выбран Сахалин как обладающий ресурсами модельного построения водородной экономики в региональном масштабе и находящийся в выгодном географическом положении по отношению к странам Азиатско-Тихоокеанского региона – потенциальным мощным потребителям нового ресурса.

Следующий этап с ориентиром на 2030 г. – сооружение головного блока атомной энерготехнологической станции для крупномасштабного производства экологически чистого водорода, сопровождаемое работами по созданию ключевых элементов инфраструктуры: утилизация CO₂, хранение и транспорт водорода.

Перспектива после 2030 г. – крупномасштабная атомно-водородная энергетика: создание серийной АЭС для централизованного крупномасштабного производства водорода в сочетании с локальными центрами электролизного и электрохимического производства водорода, в том числе на АЭС, с соответствующей инфраструктурой поставки водорода на внутренний и внешний рынок. В начале этого этапа основными драйверами внедрения атомно-водородной энергетики станут западный и восточный атомные энерго-

технологические кластеры, нацеленные на крупномасштабный экологически чистый передел природного газа в водород с использованием энергии высокотемпературных гелиевых реакторов. Поставки водорода в Европу могут быть реализованы с учётом действующей газопроводной структуры, а в страны Азиатско-Тихоокеанского региона — танкерами в криогенном или химически связанном виде.

При интеграции водорода в экономику страны и мира учитывается постулат: сколько бы ни было произведено экономически приемлемого водорода, он будет востребован и использован.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Цибульский В.Ф., Пономарёв-Степной Н.Н.* Проблемы мировой энергетики начала века. М.: Энергоатомиздат, 2008.
2. *Кухаркин Н.Е., Пономарёв-Степной Н.Н., Усов В.А.* Космическая ядерная энергетика (ядерные реакторы с термоэлектрическим и термоэмиссионным преобразованием — “Ромашка” и “Енисей”). М.: ИздАт, 2012.
3. *Ponomarev-Stepnoi N., Talyzin V., Usov V.* Russian Space Nuclear Power Systems and Nuclear Thermal Propulsion Units // Nuclear News. December 2000. P. 33–46.
4. *Александров А.П.* Перспективы развития атомной энергетики // Атомно-водородная энергетика и технология. Вып. 1. М.: Атомиздат, 1978. С. 5–7.
5. *Александров А.П., Леасов В.А., Сидоренко В.А. и др.* Структура атомной энергетики с учётом производства энергии помимо электричества // Атомная энергия. 1977. Вып. 6. С. 427–431.
6. *Александров А.П., Пономарёв-Степной Н.Н.* Атомная энергетика и технический прогресс // Атомной энергетике 20 лет. М.: Атомиздат, 1974. С. 3–23.
7. *Пономарёв-Степной Н.Н., Столяревский А.Я., Пахомов В.П.* Атомно-водородная энергетика. М.: Энергоатомиздат, 2008.
8. *Алексеев П.Н., Алексеев С.В., Андрианова Е.А. и др.* Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / Под ред. Н.Н. Пономарёва-Степного. М.: Техносфера, 2016.
9. Атомно-водородная энергетика и технология. Вып. 1–8. М.: Энергоатомиздат, 1979–1988.
10. Australia's National Hydrogen Strategy. COAG Energy Council Hydrogen Working Group. Commonwealth of Australia. November 2019. <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>
11. Korea Hydrogen Economy Roadmap 2040. IEA/IRENA Renewables Policies Database. <https://www.rvo.nl/sites/default/files/2019/03/Hydrogen-economy-plan-in-Korea.pdf>
12. Stratégie Nationale Bas-Carbone, Suivre le ministère de la Transition écologique. France. <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>
13. The U.S. Department of Energy Hydrogen Program Plan. DOE/EE-2188. November 2020.
14. Unlocking our energy productivity and renewable potential. New Zealand energy efficiency and conservation strategy 2017–2022. <https://www.mbie.govt.nz/assets/346278aab2/nzeecs-2017-2022.pdf> www.hydrogen.energy.gov
15. A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe. 8 July 2020, Brussels https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS_20_1296
16. The Future of Hydrogen (Seizing today's opportunities) Report prepared by the IEA for the G20. Japan, Typeset in France by IEA. June 2019. <https://www.enerjiportali.com/wp-content/uploads/2019/07/The-Future-of-Hydrogen.pdf>
17. Hydrogen scaling up (A sustainable pathway for the global energy transition) Hydrogen Council. November 2017. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>
18. *Большаков К.Г., Кондратьев Д.Г., Матренин В.И. и др.* Срок службы щелочных матричных топливных элементов // Электрохимическая энергетика. 2015. № 4. С. 175–179.
19. *Животов В.К., Потанин Б.В., Русанов В.Д.* Плазменный катализ — явление и приложения // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Химия низкотемпературной плазмы. М.: Янус-К, 2005. С. 4–36.
20. *Русанов В.Д., Этеван К., Бабарицкий А.И. и др.* Эффект плазменного катализа на примере диссоциации метана на водород и углерод // Доклады РАН. 1997. № 2. С. 1–3.
21. *Потехин С.В., Потанин Б.В., Деминский М.А. и др.* Эффект плазменного катализа при разложении метана // Химия высоких энергий. 1999. № 1. С. 59–66.
22. *Гребенник В.Н., Кухаркин Н.Е., Пономарёв-Степной Н.Н.* ВТГР — инновационное направление развития атомной энергетики. М.: Энергоатомиздат, 2008.
23. *Петрунин В.В., Кодочигов Н.Г., Дмитриев С.М. и др.* Ядерные энергетические установки с высокотемпературными модульными газоохлаждаемыми реакторами. В 2-х томах / Под общей ред. Н.Н. Пономарёва-Степного. Нижний Новгород: Нижегородский гос. тех. ун-т им. Р.Е. Алексеева, ОАО “ОКБМ Африкантов”, 2018.
24. *Глушков Е.С., Компаниец Г.В., Пономарёв-Степной Н.Н., Фомиченко П.А.* Физика высокотемпературных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 2008.
25. *Пономарёв-Степной Н.Н., Алексеев С.В., Петрунин В.В. и др.* Атомный энерготехнологический комплекс с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами для масштабного экологически чистого производства водорода из воды и природного газа // Газовая промышленность. 2018. № 11. С. 94–102.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ
ОТДЕЛ

НАГРАДЫ И ПРЕМИИ

ПРЕМИЯ ИМЕНИ А.П. ВИНОГРАДОВА 2020 ГОДА —
А.В. СОБОЛЕВУ



Президиум РАН присудил премию им. А.П. Виноградова 2020 года академику РАН Александру Владимировичу Соболеву за серию статей на тему “Геохимия мантийного магматизма по данным изучения включений расплава в минералах”.

А.В. Соболев создал и возглавил международную школу исследователей, которые на самом высоком мировом уровне решают актуальные задачи в области геохимии мантийного магматизма. Представленная на соискание премии серия работ включает 10 статей, опубликованных в период с 1993 по 2019 г. в ведущих отечественных и международных журналах, в том числе 5 статей — в журнале “Nature”. Содержащиеся в данной серии статей научные результаты представляют значи-

тельный вклад в развитие целого ряда проблем в области геохимии мантийного магмогенеза и эволюции мантии Земли в целом.

К наиболее ярким и важным результатам следует отнести: принципиально новые данные о роли и характере процессов рециклирования вещества в эволюции мантийного магматизма Земли, включая временные и динамические характеристики этих процессов, а также надёжные доказательства определяющей роли рециклированной океанической коры в образовании магм Сибирской трапповой провинции; полученные данные о наличии в переходной зоне резервуара архейского возраста, обогащённого водой, который мог быть источником избыточных содержаний воды и хлора в коматиитовых магмах; определения содержания и природы воды в бонинитах и первичных магмах и мантийных источниках базальтов срединно-океанических хребтов и островных дуг.

ПРЕМИЯ ИМЕНИ К.Э. ЦИОЛКОВСКОГО 2020 ГОДА —
В.А. СОЛОВЬЁВУ, С.В. БОРЗЫХ И В.Н. БАКУЛИНУ



Президиум РАН присудил премию им. К.Э. Циолковского 2020 года члену-корреспонденту РАН Владимиру Алексеевичу Соловьёву, доктору технических наук Сергею Васильевичу Борзых (Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва), кандидату техни-

ческих наук Владимиру Николаевичу Бакулину (Институт прикладной механики РАН) за цикл научных работ по проблемам обеспечения безопасности полётов и динамике перспективных пилотируемых космических аппаратов и комплексов.

Коллективом авторов проведены фундаментальные исследования по теории полёта много-модульных орбитальных станций, эффективность которых подтверждена многолетним опытом успешной эксплуатации пилотируемой станции “Мир” и международной космической станции. Созданы методики оперативного и послеполётного анализа телеметрической ин-

формации. Проведены опережающие исследования основных проблем создания и эксплуатации перспективных пилотируемых космических аппаратов и комплексов, определены пути их решения. Полученные результаты отличаются научной новизной, теоретической проработанностью, представляют практический интерес для отечественной космонавтики.