

ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ  
Управляемые  
мирные взрывы

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА  
Созидающая  
энергия распада

РАДИОЭКОЛОГИЯ  
Ради жизни  
на Земле

ежемесячный научно-информационный журнал

SCIENTIFIC  
AMERICAN

# В мире науки

[www.sci-ru.org](http://www.sci-ru.org)

Спецвыпуск-2015

12+



РОСАТОМ

**70 ЛЕТ**  
НА ШАГ  
ВПЕРЕДИ!





**«Уверен, что инновационное развитие нашей отрасли, которому мы придаем особое значение, приведет к появлению прорывных технологий, позволяющих дать ответы на глобальные вызовы, стоящие перед человечеством».**

70 ЛЕТ

# АТОМНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ

Поздравление  
генерального директора  
государственной корпорации  
по атомной энергии  
«Росатом»

Сергея  
Владиленовича

**Кириенко**

**В** этом году исполняется 70 лет с момента появления в августе 1945 г. Первого главного управления при СНК СССР, отвечавшего за работы по атомному проекту. За прошедшие десятилетия был создан исключительный по своим масштабам и задачам научно-технологический комплекс, в который вошли десятки исследовательских центров, институтов, опытно-конструкторских и промышленных предприятий.

С гордостью можем сказать, что сегодня отечественная атомная отрасль стала одним из мировых лидеров по уровню научно-технических разработок в области проектирования реакторов, создания ядерного топлива, эксплуатации атомных станций и квалификации персонала АЭС. Предприятиями «Росатома» накоплен огромный опыт в решении таких масштабных задач, как создание первой в мире атомной электростанции, строительство и эксплуатация атомных ледоколов, исследовательских реакторов и реакторов на быстрых нейтронах.

Мы используем наиболее совершенные в мире обогатительные технологии. В России и других странах «Росатом» строит ядерные энергоблоки с водородными энергетическими реакторами (ВВЭР) самого современного в мире поколения «три плюс». Благодаря научно-технологическим успехам отечественных атомщиков все больше государств мира выбирают именно российские технологии для развития своих программ мирного использования ядерной энергии. Цифры говорят сами за себя: портфель зарубежных заказов «Росатома» превысил \$100 млрд, и мы рассчитываем в ближайшие годы увеличить его до \$150 млрд.

Успех «Росатома» опирается на научные и технологические достижения настоящего и прошлого. Как известно, отечественная гражданская атомная отрасль выросла из военной программы, поставившей науку на службу безопасности

и обороноспособности нашей страны. Многие технологии, созданные в интересах обороны, нашли свое мирное применение в различных отраслях экономики. Над развитием отрасли трудились великие ученые, в том числе научный руководитель атомного проекта СССР академик И.В. Курчатов, президент Академии наук СССР А.П. Александров, академики АН СССР Ю.Б. Харитон, Я.Б. Зельдович, А.Д. Сахаров, нобелевские лауреаты Л.Д. Ландау, И.Е. Тамм, И.М. Франк, П.А. Черенков и многие другие, чей труд

## «Росатом» уверенно смотрит в будущее

привел нашу страну к мировому лидерству по целому ряду направлений. К 1980-м гг. СССР занял ведущее место в области радиационных технологий, электрофизических установок, лазерных и плазменных технологий.

И сегодня мы остаемся лидерами исследований в области управляемого термоядерного синтеза. Отечественная технология «токамак» лежит в основе строящегося сегодня во Франции Международного термоядерного экспериментального реактора (*ITER*), который многие называют энергетическим будущим человечества. Инновационные разработки «Росатома» дали мощный импульс развитию смежных направлений. Мы видим, что атомные технологии сегодня

успешно используются в машиностроении, материаловедении, медицине, сельском хозяйстве, химической промышленности, в освоении космического пространства и изучении глубин Мирового океана. Атомная отрасль сегодня — это новые материалы, радиационные, лазерные, плазменные технологии, изотопное производство. «Росатом» не просто накапливает научные знания, но делится ими со всеми, кто трудится на благо России и человечества в целом. Мы оказываем всестороннюю помощь заинтересованным странам и в строительстве атомных объектов, и в развитии атомной науки.

Научная международная кооперация госкорпорации поистине огромна. Российские ученые-атомщики из институтов «Росатома», Курчатовского института, ОИЯИ участвуют в реализации многих международных масштабных проектов и экспериментов фундаментальной науки, таких как рентгеновский лазер на свободных электронах (*XFEL*), Европейский исследовательский центр

ионов и антипротонов (*FAIR*), а также множестве других. И даже самый крупный в мире ускоритель заряженных частиц, Большой адронный коллайдер *CERN*, был построен при серьезном участии российских специалистов-атомщиков. Все это говорит о том, что современные научные прорывы невозможно представить без знаний, накопленных уникальным коллективом российских атомщиков. «Росатом» уверенно смотрит в будущее.

Не сомневаюсь в том, что инновационное развитие нашей отрасли, которому мы придаем особое значение, приведет к появлению прорывных технологий, позволяющих дать ответы на глобальные вызовы, стоящие перед человечеством. Современные задачи, требующие научного ответа, не менее масштабны, чем 70 лет назад. Сегодня у отечественной атомной отрасли есть все необходимые ресурсы для их решения: мощнейшая научная школа, передовая экспериментальная база и сильнейшие профессионалы.

## **Поздравляю вас, дорогие друзья, с этой знаменательной датой и желаю вам крепкого здоровья, благополучия и новых достижений в нашей совместной работе!**

Специальный выпуск журнала «В мире науки» посвящен юбилею нашей отрасли. Он позволит читателям заглянуть в будущее, каким его видит госкорпорация «Росатом» — корпорация знаний.

Генеральный директор  
госкорпорации «Росатом»

Сергей  
Владиленович

**Кириенко**

# АТОМНАЯ ОТРАСЛЬ: БЕЗОПАСНОСТЬ И НЕЗАВИСИМОСТЬ РОССИИ

Атомная отрасль — одна из самых молодых областей человеческой деятельности — начиналась как раздел фундаментальной химии, посвященный строению вещества. В результате в 1911 г. Эрнест Резерфорд открыл планетарную модель атома, и сразу стало ясно, что в атомном ядре сосредоточена гигантская энергия, в миллионы раз превосходящая энергию химической связи. Однако в то время мало кто думал о практическом применении этого открытия.

Перспективы открылись тоже неожиданно, когда Энрико Ферми выдвинул идею получать новые тяжелые элементы путем присоединения к их ядрам нейтронов.

Оказалось, однако, что ядра под действием нейтронов делятся, а не становятся тяжелее.

На основании этого эксперимента 1939 г. всего через шесть лет создана атомная бомба. Поразительна скорость, с которой эти научные открытия нашли практическое применение: от чисто фундаментальных лабораторных опытов — к получению самого мощного на Земле источника импульсной энергии.

Чуть позже ядерная энергия была использована в мирных целях — для получения электроэнергии.

И в первом, и во втором случаях основой стала фундаментальная наука, которая была и остается прочным базисом для всех разработок в нашем «Росатоме».

Прошло 70 лет с момента создания Первого главного управления при СНК СССР,

курирующего атомный проект, которое впоследствии было преобразовано в Министерство среднего машиностроения — легендарный Минсредмаш. Сейчас это — госкорпорация «Росатом».

Как и во все предыдущие годы, «Росатом» сегодня выступает движущей силой многих фундаментальных и прикладных работ. Здесь собраны блестящие кадры, выдающиеся ученые, инженеры и технологи, которые обеспечивают стабильное поступательное развитие атомной отрасли. Мы благодарны многим поколениям атомщиков за то, что наша страна занимает лидирующие позиции в этой важнейшей области человеческой деятельности.

Мы должны помнить, что безопасность и независимость нашей страны в решающей степени определяются ядерным потенциалом, гарантирующим мирную жизнь людей, свободу и независимость России. Этим мы обязаны нашим великим предшественникам, ученым нобелевского класса: академиком И.В. Курчатову, Я.Б. Зельдовичу, А.Д. Сахарову, Ю.Б. Харитону, Н.Н. Боголюбову, И.Е. Тамму, К.И. Щелкину, Л.Д. Ландау, А.П. Александрову, В.Л. Гинзбургу, И.М. Халатникову и другим ученым, составляющим гордость отечественной и мировой науки.

Российская академия наук с особым чувством отмечает юбилей атомной отрасли. Наше многолетнее творческое сотрудничество состоит не только в том, что академическая наука питает эту

**«Мы должны помнить, что безопасность нашей страны в решающей степени определяется ядерным потенциалом, гарантирующим мирную жизнь людей, свободу и независимость России».**

отрасль новыми знаниями, идеями и кадрами, но и в том, что отрасль ставит перед академией масштабные задачи, приводящие к созданию новых научных направлений, по которым наша страна занимает в мире передовые позиции.

Поздравляя с юбилеем ученых-атомщиков, всех сотрудников «Росатома», хотел бы пожелать укрепления прочного сотрудничества с РАН, которая всегда считала за честь работать со специалистами атомной промышленности.

Здоровья, оптимизма и всего самого доброго вам и вашим близким, дорогие друзья!

Президент РАН,  
главный редактор  
журнала «В мире науки»

Владимир  
Евгеньевич

**Фортов**



Уважаемые коллеги,  
дорогие друзья!

# МИРНЫЙ АТОМ — К НОВЫМ ГОРИЗОНТАМ

Поздравление директора  
НИЦ «Курчатовский институт»

Михаила  
Валентиновича

## Ковальчука

**Ю**билей — это повод задуматься, оглянуться назад, оценить, что сделано. Отмечая 70-летие атомной отрасли нашей страны, мы подводим итоги и смотрим в будущее, закладываем его базу, делаем реальностью.

В далеком 1945 г. в тяжелейших условиях послевоенной разрухи нашим великим предшественникам удалось создать такую совершенную научную школу, которая не только решила в кратчайшие сроки военно-стратегическую задачу по созданию ядерного оружия, но и стала родоначальницей взрывного развития множества уникальных технологий, научных направлений, составляющих гордость нашей и мировой науки по сей день.

Из атомной бомбы позднее возникла атомная энергетика, как одно из ее направлений развилась атомно-водородная энергетика. Следующим шагом стал переход от процесса деления атомного ядра к управляемому термоядерному синтезу, термоядерной энергетике. Для этих работ необходимо было освоить магнитное удержание плазмы, а значит, возникла потребность в новых материалах со свойствами сверхпроводимости.

Ядерный реактор, установленный на подводную лодку, обеспечил ей недоступные ранее длительность переходов, глубину погружения и т.д. После атомной подводной лодки «Ленинский комсомол» мы создали первый в мире атомный ледокол «Ленин», благодаря чему наш ледокольный атомный флот сегодня обеспечивает России передовые позиции в Арктике. Для атомного проекта необходимо было научиться выделять различные изотопы и работать с ними, и мы создали промышленность по разделению изотопов, которая стала основой для ядерной медицины, диагностики, позитронно-эмиссионной томографии, лучевой терапии и т.д. То есть существенная часть современной цивилизации так или иначе связана с реализацией нашими предшественниками атомного проекта.

Курчатовский институт с особым чувством отмечает юбилей атомной отрасли. Именно здесь в декабре 1946 г. на реакторе Ф-1 была осуществлена первая на континенте Евразия цепная реакция деления урана. Наш основатель Игорь Васильевич Курчатов еще до завершения оружейных разработок начал задумываться о широком использовании атомной энергии в мирных целях. В сфере его интересов были атомная энергетика, флот, летательные аппараты и позднее — космос.

**«Ученые,  
конструкторы,  
инженеры  
российской  
атомной отрасли  
продолжают  
плодотворно  
работать,  
приносить  
неоценимую  
пользу нашей  
науке, стране.  
Мы имеем сегодня  
все возможности  
для реализации  
новых идей и новых  
достижений. И я  
искренне желаю  
этого всем нам!»**



К концу 1940-х гг. И.В. Курчатов выдвинул задачу спроектировать и построить опытно-промышленную атомную электростанцию. Идея конструкции активной зоны уран-графитового канального реактора станции была предложена самим Игорем Васильевичем и его соратником С.М. Фейнбергом. Пуск первой в мире промышленной АЭС полезной мощностью 5 тыс. кВт был осуществлен 27 июня 1954 г. под руководством И.В. Курчатова и его заместителя А.П. Александрова. Этот день по праву считается днем рождения ядерной энергетики. Именно тогда зародилось и реакторное материаловедение как самостоятельное научное направление.

Уже в июне 1955 г. И.В. Курчатов и А.П. Александров возглавили разработку программы развития ядерной энергетики в СССР для энергетических, транспортных и других мирных целей. Началось сооружение крупных атомных электростанций под научным руководством Курчатовского института.

Очевидно, что ядерные технологии безальтернативны на ближайшие десятилетия, а значит, всем нам предстоит много непростой, но очень интересной работы. Это касается и улучшения параметров, продления сроков службы реакторов, и реабилитации загрязненных территорий и объектов, повышения

радиационной безопасности, в том числе с помощью новых радиационно устойчивых материалов с использованием нанотехнологий, разработки новых видов топлива. Более отдаленная перспектива — управляемый термоядерный синтез и сопутствующие технологии, в частности плазменные. Новые возможности открываются в развитии ядерной медицины, наработке изотопов, сверхпроводимости. Перспективное направление — гибридные реакторы, где отработавшее ядерное топливо в виде blankets вокруг этого реактора будет превращаться в новое топливо. Это замкнутый цикл в принципиально новой, так называемой зеленой ядерной энергетике. Еще одно интересное направление — использование обычных и быстрых реакторов малой мощности. Такие реакторы по своим конструкционным параметрам сами по себе обеспечивают пассивную безопасность, а кроме того их можно изготавливать на заводе в рамках стандартизированного серийного производства и устанавливать в любом месте.

Ученые, конструкторы, инженеры российской атомной отрасли продолжают плодотворно работать, приносить неоценимую пользу нашей науке, стране. Мы имеем сегодня все возможности для реализации новых идей и новых достижений. И я искренне желаю этого всем нам!

Директор НИЦ  
«Курчатовский институт»

Михаил  
Валентинович

**Ковальчук**

# Ядерные и радиационные технологии: наземные, подземные, космические

## В далеком космосе

исследования воздействия  
малых доз радиации

## В космосе

ядерные  
ракетные  
двигатели

## В воздухе

радиационная  
модификация  
поверхности

новые материалы

## На земле

атомные станции

радиационные  
методы очистки  
и стерилизации

опреснительные  
установки

машиностроение

новые материалы

ядерная медицина

электроэнергетика

## На воде

атомные  
ледоколы

плавучие  
атомные  
станции

стерилизация  
морепродуктов

лазерные технологии  
ликвидации разливов  
нефти

## под водой

атомные подводные  
лодки

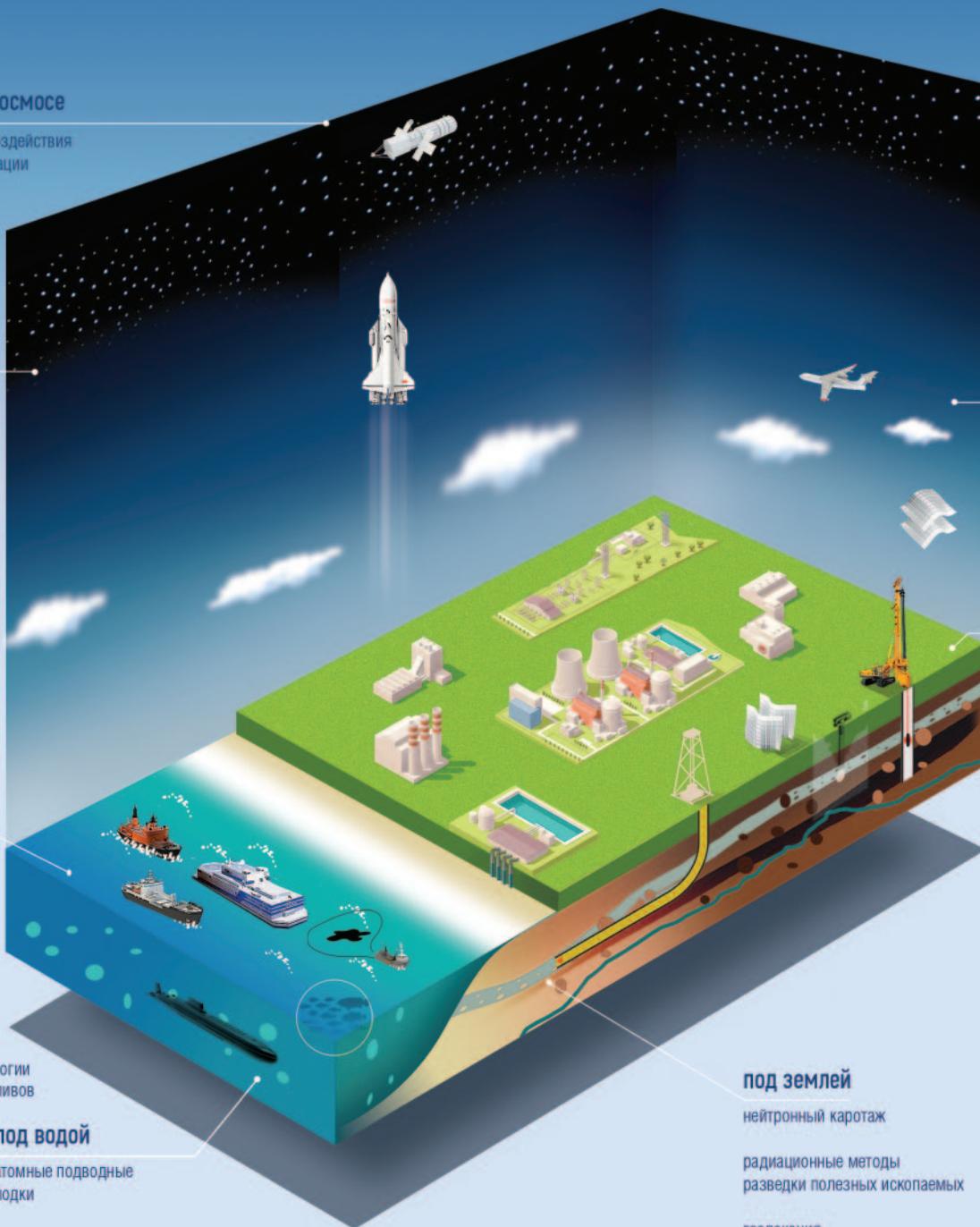
## под землей

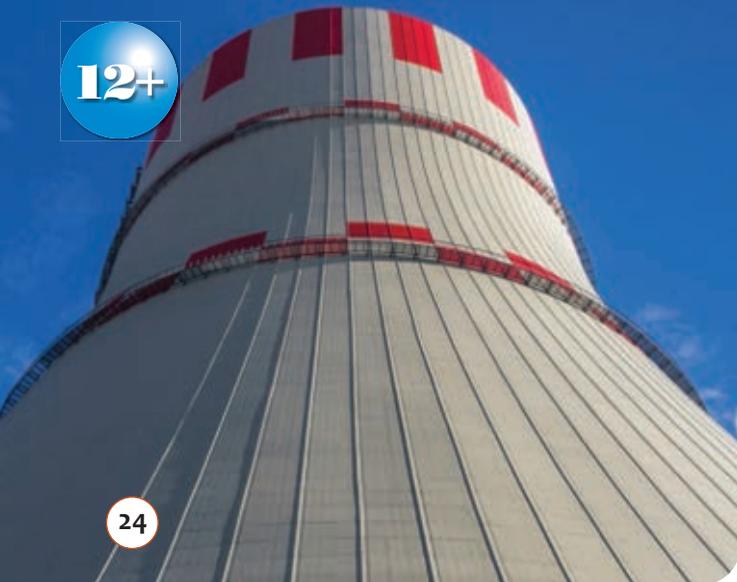
нейтронный каротаж

радиационные методы  
разведки полезных ископаемых

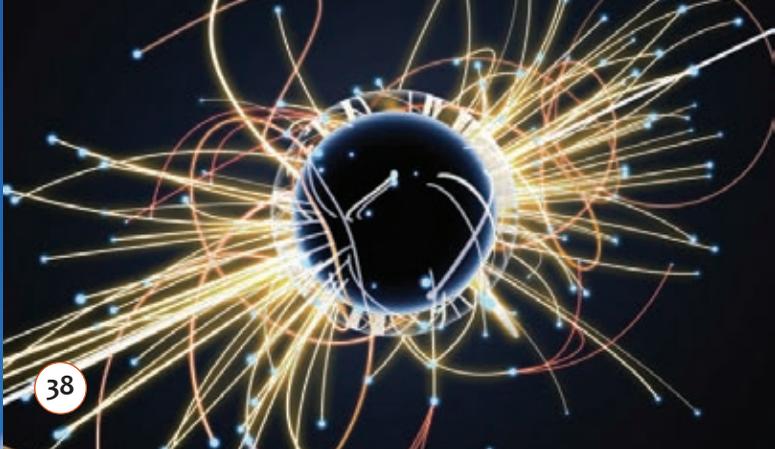
геолокация  
радиационный контроль  
подземных вод

извлечение и обогащение  
урановых руд





24



38

# СОДЕРЖАНИЕ

## Спецвыпуск-2015

### Вступительное слово

#### 70 ЛЕТ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ

Поздравление генерального директора государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» **Сергея Кириенко**

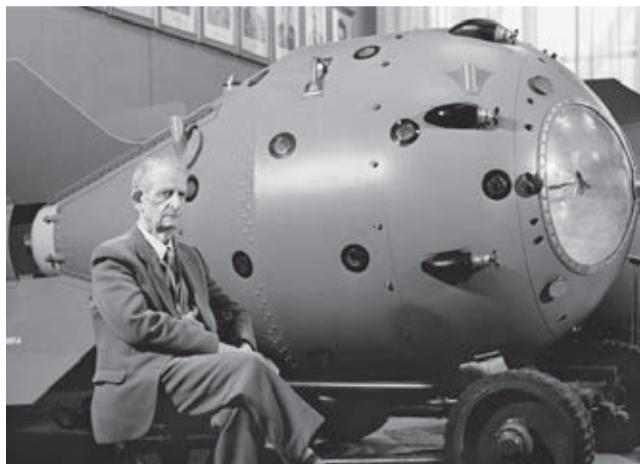
#### АТОМНАЯ ОТРАСЛЬ: БЕЗОПАСНОСТЬ И НЕЗАВИСИМОСТЬ РОССИИ

Поздравление президента РАН, главного редактора журнала «В мире науки» **Владимира Фортова**

#### МИРНЫЙ АТОМ — К НОВЫМ ГОРИЗОНТАМ

Поздравление директора НИЦ «Курчатовский институт» **Михаила Ковальчука**

### Ядерное оружие



#### ТАИНСТВЕННЫЙ МИР ВЗРЫВА

**Владимир Губарев**

Академик **Евгений Аворин** не считает себя бомбоделом, хотя его имя значится в списках создателей почти каждой термоядерной боеголовки

#### МЫ УМЕЛИ ПРЕДУГАДЫВАТЬ БУДУЩЕЕ...

**Владимир Губарев**

Академик **Радий Ильяев** — о роли ядерного оружия в современной России и о славном прошлом атомного проекта

### Атомная энергетика РФ

#### ОТ РЕВОЛЮЦИИ К ЭВОЛЮЦИИ

24

**Равиль Атжанов**

О проблемах, истории и перспективах мирного атома мы беседуем с заместителем директора НИЦ «Курчатовский институт» — первопроходца работ по ядерной энергетике в нашей стране — профессором **Ярославом Штромбахом**

#### РЕАКЦИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

32

**Валерий Чумаков**

О первых шагах мирного атома в СССР, о нынешнем дне и о перспективах российской ядерной энергетике рассказывает советник генерального директора ГК «Росатом» профессор **Владимир Асмолов**

### Ядерная энергетика нового поколения



#### СОЗИДАЮЩАЯ ЭНЕРГИЯ РАСПАДА

38

**Валерий Чумаков**

Член правления ГК «Росатом», заместитель генерального директора — директор Блока по управлению инновациями профессор **Вячеслав Першуков** — о новой платформе ядерной энергетике

#### ДЕЛО НА БЛИЖАЙШЕЕ ТЫСЯЧЕЛЕТИЕ

44

**Валерий Чумаков**

О перспективах развития атомной энергетике и путях решения актуальных задач в этой области — научный руководитель проектного направления «Прорыв» профессор **Евгений Адамов**



54

## ПРИРУЧАЕМ ТЕРМОЯД

**Михаил Петров**

О том, как в будущем переплетутся ядерная и термоядерная энергетика, нам рассказал президент НИЦ «Курчатовский институт» академик **Евгений Велихов**

50

## Радиоэкология

### РАДИОЭКОЛОГИЯ

**Александр Титков**

Об истории возникновения радиационной экологии и о том, какие задачи стоят перед радиоэкологами сегодня, — академик **Рудольф Алексахин**

54

## Освоение Арктики



### 200 ТЫСЯЧ КИЛОВАТТ ПОД ВОДОЙ

**Валерий Чумаков**

Поговорить о развитии подводной атомной энергетики мы решили с патриархами этого направления деятельности «Росатома», участвовавшими в создании нескольких поколений реакторов АПЛ, профессорами **Георгием Тошинским** и **Евгением Клочковым**

64

### МЫ ГОВОРИМ — АРКТИКА, ПОДРАЗУМЕВАЕМ — «РОСАТОМ»...

**Валерий Чумаков**

О значении атомной энергетике в Арктическом регионе РФ — академик **Ашот Саркисов**

72



НА ОБЛОЖКЕ:  
визуализация столкновения частиц в БАК

## Ядерная медицина

### ИЗОТОПЫ НА СТРАЖЕ ЗДОРОВЬЯ

78

**Наталья Лескова**

Каким образом можно решить вопросы обеспечения наших пациентов высококвалифицированной медицинской помощью и какие проблемы ждут на этом пути, рассказывают член-корреспондент РАН **Андрей Каприн** и академик **Валентин Смирнов**

## Аддитивные технологии

### ТЕХНОЛОГИИ НА ВЫРОСТ

84

**Валерий Чумаков**

О перспективах развития аддитивных технологий, о том, как они изменят нашу жизнь, — профессор **Алексей Дуб**

## Космические энергетические установки



### АТОМОПЛАН, АТОМОЛЕТ, АТОМОСАТ...

92

**Валерий Чумаков**

Академик **Николай Пономарев-Степной** стоял у самых истоков ядерной энергетике для авиации, ракет и космоса

### ВОПЛОЩАЯ МЕЧТУ

98

**Валерий Чумаков**

Об истории и перспективах космической ядерной энергетике рассказывает член-корреспондент РАН **Юрий Драгунов**

## Материаловедение

### НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НОВОЙ ЭПОХИ

104

**Виктор Фридман**

Материаловедение не случайно стало самостоятельной областью науки в атомной отрасли. Об особенностях этого направления мы беседуем с профессором **Георгием Карзовым**



# Таинственный мир взрыва



**Я теперь работаю на мир. Впрочем, как и всю жизнь — потому что наше оружие, убежден, служит безопасности на планете**

**И**спытаний в его жизни, как и у всех нас, было множество, и подчас весьма тяжелых. Но в отличие от других он всегда был выдержан, спокоен, уверен в лучшем исходе — по натуре своей он оптимист. И это его качество особо заметно среди нас, предпочитающих (что греха таить!) пессимистический настрой. Особо поразил меня академик в начале лихих девяностых, когда в Снежинск не завозили картошку, — закрытый город снабжался извне, из-за колючей проволоки, что отгораживала его от остального мира. Понятно, что среди физиков специалистов-агрономов было маловато, но уже вскоре самым признанным стал **Евгений Николаевич Аврорин**.

Однажды я пошутил: мол, герой, лауреат, академик получил со своего огорода в 12 соток аж три мешка картошки! Слова эти я произнес с гордостью за наших ученых: дескать, и такое они могут. И тут же услышал реплику героя: «Обижаете: на самом деле 15 мешков! Парочку могу отгрузить в Москву, если голодать начнете».

Шутки шутками, но однажды внук академика доставил мне в гостиницу банку с солеными огурцами. Вкуснотища! Мало того что огурчики один к одному, хрустящие, истинно «закусочные», но и сотворены академическими руками, что добавляет им неповторимый аромат. Однако ради истины добавлю: в той банке есть и труд Верочки, бессменной спутницы Евгения Николаевича с той самой поры, когда судьба свела молодого

физика и юную «вычислительницу», — машин тогда не было, и их заменяли девчушки, в экстренном порядке выученные вести математические расчеты... И было это давно, в середине 1950-х гг., когда зарождался ядерный центр на Урале. Впрочем, можно назвать точную дату: 60 лет назад. И ее мы отметили в нынешнем июне ярко и торжественно. Ночной салют над Снежинском продолжался непривычно долго, и могло даже показаться, что здешний народ только что выиграл войну.

А разве не так? К счастью, войну не «горячую», а холодную. Выиграл или выигрывает? Оба определения имеют право на существование. А потому наш разговор с почетным научным руководителем Российского федерального ядерного центра я начал с вопроса:

— **Нравится, если кто-то называет вас бомбоделом?**

— Ну, я не совсем бомбодел, т.е. в малой степени бомбодел. Конечно, я занимался разработкой оружия, но больше все же наукой, которая с этим связана. И также «изделиями» для промышленного применения — тоже взрывными, но не военными.

— **Вы слегка лукавите. Я был в музее оружия, и там сейчас вывесили таблички, на которых написано, кто их создавал. И в списке создателей почти каждой термоядерной боеголовки значится фамилия Аврорин.**

— Все-таки на первом месте Лев Петрович Феокистов. В основном — это его заслуга. Где-то и я есть, конечно...

— **А сколько штук этих «изделий» у вас на счету?**

— Не знаю, не считал.

— **Почему?**

## В списке создателей почти каждой термоядерной боеголовки значится фамилия Аврорин

— Потому что не очень понятно, что такое «штука». Бывают же просто какие-то разновидности «изделия», разные его варианты, так что не очень просто все сосчитать. Номер один, а потом идут еще всякие дополнительные индексы. В общем, не знаю, сколько штук.

— **Но много?**

— Нет, немного. Много просто не нужно.

— **Но ведь звезда героя на груди?**

— Она, скорее, за мирные «изделия». И чуть-чуть за военные. В указе, сами понимаете, написано очень неопределенно: мол, за выполнение специальных заданий Родины. В то время я как раз занимался мирными зарядами.

— **Поэтому я и сказал, что вы странный бомбодел. Да и ваша судьба в науке и в Снежинске началась, в общем, с уникального физического эксперимента, правильно?**

— Не совсем так, все-таки год примерно мы занимались именно бомбами. А вот в 1956–1957 гг. я занимался в основном действительно уникальным — он до сих пор уникален! — физическим экспериментом.

— **А почему он уникален?**

— В мире ничего другого похожего не было.

— **Американцы пытались повторить?**

— Нет. Насколько я знаю, не пытались. У них были эксперименты по отдельным направлениям, а вот такого комплексного эксперимента — специального, не попутного с испытанием какого-то заряда, и широкого назначения — не было.

— **Почему он потребовался?**

— Потребовался он из-за удивления членов Политбюро. Когда им докладывали о взрыве первой настоящей термоядерной бомбы, то сказали, что взрыв произошел на одну микросекунду раньше, чем ожидалось, чем было по расчетам. Это вызвало смех, а на самом деле вещь была очень серьезная, т.к. оказалось, что мы недостаточно хорошо знаем некоторые свойства вещества и его взаимодействие с излучением. Вот для того, чтобы измерить эти свойства, и был осуществлен эксперимент. На Земле подобных условий просто невозможно создать, кроме как при ядерном взрыве. К сожалению, специальный эксперимент был не вполне удачным. Заряд, который создавал необходимые условия, сработал несколько ниже, чем мы рассчитывали. Но тем не менее результаты были получены очень богатые. Кстати, моя кандидатская диссертация была посвящена обработке результатов этого эксперимента.

— **Именно тогда родилась легенда, что Аврорин обязательно перед взрывом садится на камень и читает книжку? По крайней мере, об этом рассказывают все, кто работал с вами на Новой Земле...**

— Ну, не обязательно на Новой Земле, и в Семипалатинске тоже. На самом деле бывает иногда напряженная обстановка, люди начинают обсуждать: а что будет, если будет что-то не так или пойдет как-то иначе? Я не люблю участвовать в таких «дискуссиях», а потому ухожу в фургон или в домик, где обычно находятся руководители опыта, сижу и спокойненько читаю.

— **Художественную литературу или техническую?**

— Смотрю в какую-то книгу, потому что не очень важно, какая она.

— **Значит, секретную... А теперь, если не возражаете, затронем другую тему. Вы ведь один из тех людей, которых называют первыми, когда речь заходит о мирных ядерных взрывах. Идея их появления ясна, и вы все увлеклись этим делом и в Сарове, и в Снежинске. Правильно?**

— Да, это так. Кстати, настоящий первый чистый ядерный заряд был сделан под руководством Юрия Алексеевича Трутнева. Это ему и его команде удалось добиться чистой термоядерной реакции. Она начиналась под действием, конечно, атомного взрыва, но тем не менее это была чисто термоядерная реакция.

— **А вы как вышли на эти работы?**

— Лев Петрович Феокистов увлек меня. Это был еще один очень интересный и опять же уникальный

эксперимент. Идеи принадлежали Льву Петровичу, а проводился он под руководством Евгения Ивановича Забабахина и Бориса Васильевича Литвинова. Ну и я тоже участвовал. Было впервые получено термоядерное зажигание чистого дейтерия. Ю.А. Трутнев добился зажигания твердого соединения, а у нас был чистый дейтерий. А дальше пошли интересные работы, которые в конце концов привели к тому, что был создан уникальный заряд с совершенно потрясающей чистотой...

— **Нет радиации?**

— Практически ее нет, а та, что остается, направляется в специальную капсулу.

— **Новый заряд начали использовать в скважинах?**

— Нет, там используется обычный атомный заряд. Там чистота не нужна, потому что взрывы проводятся достаточно глубоко, т.е. идет самозахоронение. И радиоактивные продукты, если делать все как следует, никогда не попадают в обитаемую среду, т.е. наверх не просачиваются. Там требуются другие вещи. Малый заряд создан в нашем институте по идее Альберта Петровича Васильева. Это такой заряд, который имеет несколько десятков модификаций, практически непрерывно можно в достаточно широком диапазоне менять его мощность. Такой заряд применялся много раз и для сейсмического зондирования, и для интенсификации нефтяных месторождений. Для скважинных работ использовался в основном этот заряд. Ну и еще одно, очень важное, уже чисто конструктивное свойство: у заряда должна быть высокая термостойкость, потому что в глубине земли очень жарко, почти как в аду.

— **Значит, вы знаете, где находится ад?**

— В аду, как известно, жарко. Чем глубже, тем жарче.

— **И когда вы взорвали свой первый «чистый» заряд?**

— Опять же было несколько модификаций. Одна из них была использована для дробления апатитовой руды. Это очень хороший эксперимент. Он проводился два раза.

— **Вы давно были на Кольском полуострове, на том месте, где взрывали свои заряды?**

— Несколько лет назад был юбилей Ботанического сада, который основал мой отец. И мы большой семейной командой — моя сестра, ее дети и мой сын — поехали на место эксперимента. Это было хорошее время в Заполярье — конец августа, начала сентября. Комаров уже нет, а снега еще нет.

— **И грибов много.**

— Ужас сколько!

— **Я тоже был на том месте. Но ведь там ничего нет! Какая-то будочка стоит, и все!**

— А что бы вы хотели там увидеть?

— **Хотя бы какой-то памятный знак. А как специалисты оценивают эксперимент? Я имею в виду геологов, промышленников.**

— Встречались с теми, кто участвовал в работе, а потом обрабатывали результаты — выпускали руду, измеряли ее активность и т.д. В принципе, они довольны.

— **Но Норвегия перепугалась!**

— К сожалению, продолжения не было... А грибов там, конечно, тьма! Мы заезжали в долину на военном газике. Сначала у нас были корзины, ведра. Потом поняли, что это дело безнадежное, и стали сбрасывать грибы просто в кузов.



Заряды для мирных взрывов

— **А потом вы пытались прорыть канал?**

— Неудачный был эксперимент.

— **Вы взорвали сразу три заряда?**

— Да.

— **И получился «свиной»?**

— Когда мы шли по этому самому месту, я сказал, что, мол, как-то не очень красиво получилось. Один из гидротехников заметил: по-нашему это называется «свиной». Так за экспериментом и осталось такое определение.

— **Но все было чисто?**

— Абсолютно. Однако канал не получился.

— **Местные экологи считают, что «грязь» есть?**

— Это неправда. Потом много раз специалисты проверяли. Есть следы радиоактивности, но неопасные. Там образовалось искусственное озеро. Оно вполне пригодно для использования — рыбу ловить можно, купаться. Но добраться до тех мест сложно — тайга, глухомань.

— **Скажите, по-вашему, это направление мирного использования ядерных взрывов перспективно или нет?**

— Безусловно. Очень обидно, что такая мощь, такая сила не используется для промышленных применений. Наверное, взрывы на выброс, хотя они наиболее эффективны, трудно проводить. Но, как показал опыт на канале, их все-таки можно проводить очень чисто. Очень чисто, если принять специальные меры, такие, например, как были на Апатитах. Там весьма значительную часть активности, больше 90%, удалили в пустую породу, которая не подлежит использованию.

**— То есть вы уже можете управлять активностью?**

— Да, этим можно управлять. Поэтому даже взрывы на выброс вполне возможны. А уж камуфлетные взрывы, скважинные, безусловно полезны. Эксперимент сейсмического зондирования



Первая серийная боеголовка

дал очень много. Я спрашивал Николая Павловича Лаверова, используются ли эти данные. Он говорит, что в высшей степени используются, поскольку они дали сведения о глубинном строении Земли на очень большом расстоянии.

**— Все нефтяные и газовые месторождения Восточной Сибири открыты благодаря этим работам?**

— Об этом лучше порасспрашивать академика Лаверова.

**— Как вы относитесь к проекту по Удокану, где предполагалось вскрыть с помощью ядерных взрывов крупнейшее месторождение меди?**

— Очень хорошо было бы его провести. Немного, может быть, рано его задумали, потому что тогда не было еще ни чистых зарядов, ни возможностей управления выбросом активности.

**— А сколько там предполагалось взрывов?**

— Точное количество не помню, но много, т.к. нужно было снять несколько десятков метров породы на очень большом протяжении, т.е. это должны были быть мегатонные взрывы.

**— Судьба БАМ была бы иной, если бы удалось этот эксперимент осуществить?**

— Ну, наверное, потому что был бы открытый доступ для добычи руды, что гораздо более эффективно, чем штольневый метод.

**— А не следует ли вернуться к этому проекту?**

— Это одно из самых богатых в мире месторождений меди, и поэтому, конечно, его надо разрабатывать. Месторождений меди не так уж много. Хотя в советское время было такое: при разработке железной руды в отвалах меди было больше, чем в месторождениях меди, которые разрабатывались.

**— В Средмаше такого быть не могло?**

— Нет. И это колоссальная заслуга Ефима Павловича. Он наряду с добычей урана организовал добычу золота. И он очень-очень этим гордился, потому что это была заметная доля добычи золота вообще в Советском Союзе.

**— Значит, если заканчивать разговор о мирном использовании ядерных взрывов, которыми вы занимались, то вы, естественно, за них, за то, чтобы их возродить на нынешний момент?**

— Может быть, более важное дело — возродить научные эксперименты с использованием ядерных взрывов. Это можно провести очень чисто, и можно получить совершенно удивительные результаты, которые никакими другими способами получить нельзя.

**— Насколько я знаю, вы и ваши друзья занимались одной фантастической идеей. Я имею в виду создание дейтериевой энергетики.**

— Было такое.

**— В то время вы были научным руководителем и директором института. И вы всячески поощряли эти работы. Почему?**

— Это реальный путь для использования термоядерной энергии в энергетике.

**— А что это такое?**

— Проект крайне сложный в инженерном отношении, потому что должна быть большая подземная емкость, должны быть разработаны способы преобразования термоядерной энергии в электрическую, т.е. инженерных проблем очень много.

**— Объясните, пожалуйста, суть проекта.**

— Идея была такой: максимально чистый ядерный заряд поместить под землю. Он там взорвется, образуется горячая плазма. А потом горячий газ можно использовать уже обычным способом — передать на турбины, в общем, превратить в электричество.

— Но ведь там один ядерный взрыв должен идти за другим?

— Конечно, взрывов должно быть много. Причем довольно мощных. Так что проблем с такой энергетикой тоже чрезвычайно много. Но, по крайней мере, научная проблема решена — в отличие от всех других способов получения термоядерной энергии.

— А международный реактор?

— В токамаке даже смесь дейтерия с тритием не горит, а это в 100 раз легче, чем зажечь дейтерий. Американцы никак не могут даже в маленьком шарике получить настоящую термоядерную энергию.

— А вы ее получаете элементарно?

— Только во взрыве, но в любых количествах.

— Это же фантастическая идея! Представьте, несколько таких станций построить под землей — и весь мир будет снабжен энергией в избытке!

— Но не каждая идея осуществима. Я немножко скептически отношусь к этому проекту. Да, научная проблема решена, но инженерных проблем масса. К тому же нужно, чтобы общественность примирилась с таким проектом, приняла его. А это не менее сложно, чем решение инженерных вопросов.

— То есть как физик вы понимаете, что это можно сделать. А как человек?

— Уже даже как инженер — сомневаюсь, а как человек сомневаюсь вдвойне. Если такой проект начнет осуществляться, то это будет не скоро, когда все остальные источники энергии будут исчерпаны. Может быть, человечеству тогда придется и им воспользоваться.

— А еще какими фантастическими проектами вы занимались?

— Не фантастический, а вполне реальный был проект. После того как провели совместный эксперимент по контролю с американцами...

— «Семипалатинск — Невада», вы имеете в виду?

— Да. Когда мы обсуждали с американцами в Женеве его результаты, я предложил подумать о возможности проведения совместного научного эксперимента. Можно измерять нейтронно-ядерные сечения редких веществ, изучать их свойства при высоких, сверхвысоких давлениях и температурах. Можно было получать трансураны тоже вот таким взрывным способом.

— И алмазы?

— И алмазы тоже. Значит, с этой идеей пошел к Виктору Никитовичу Михайлову, который был руководителем делегации. Говорю: «Можно предложить это американцам?» Он отвечает: «Давай, конечно. Позови их на обед». В нашем представительстве во время обеда я и предложил этот эксперимент. Американцы сказали, что должны

## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ АВРОРИН

Академик РАН.

■ Научный руководитель Российского федерального ядерного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики» им. академика Е.И. Забабахина (РФЯЦ-ВНИИЭФ).

■ Участвовал в разработке первого советского двухкаскадного термоядерного заряда.

■ Председатель Снежинского отделения Российского Пагуошского комитета при Президиуме РАН.

посоветоваться. Они посоветовались и ответили, что им не рекомендовали продолжать обсуждение этого вопроса.

— Вы сожалеете, что сейчас контакты с американцами прекратились?

— Конечно, это очень плохо. И для нас, и для американцев, и для мировой науки. Научное сотрудничество всегда полезно.

— О чем вы мечтаете?

— В моем возрасте основная мечта такая: чтобы то, чем мы занимались, не пропало, чтобы пришли хорошие молодые люди, чтобы можно было им передать свой опыт, научить их нашему делу, которое очень деликатное... И, может быть, самая главная опасность (это, кстати, и американские коллеги об этом говорили), что люди чересчур поверят в расчеты и в результате создадут оружие, которое не работает. Очень важно передать наш опыт, опыт тех людей, которые прошли все испытания, перешагнули все барьеры, которые перед нами поставила природа.

— В общем, ядерное оружие — сложная штука...

— Очень! И зависит от многих деталей, от многих тонкостей.

— Однажды я разговаривал с директором радиохимического завода. Он говорит: «Знаешь, всю жизнь работал я на войну, а сейчас, в конце своей жизни, начал работать на мир» Он начал создавать МОХ-топливо для реакторов будущего. У вас никогда не было такого ощущения? Или появилось, когда провели мирные ядерные взрывы?

— В какой-то мере появилось. Ну и в последнее время мы все-таки в небольшой степени, но участвуем и в работах по ядерной энергетике. Нам, конечно, ближе всего реакторы на быстрых нейтронах — это, так сказать, «наши» нейтроны. Так что и я теперь работаю на мир. Впрочем, как и всю жизнь — потому что наше оружие, убежден, служит безопасности на планете. Во имя этого мы всегда и работали. ■

Беседовал Владимир Губарев

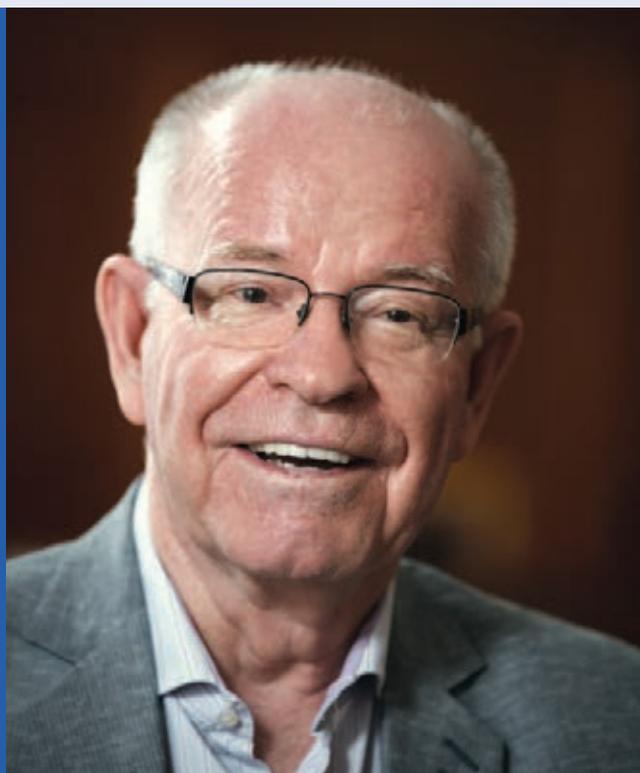
VOLUME XXVII—No. 14 U.S. News & World Report  
30.1X 24  
**WHAT TO DO ABOUT A-BOMB  
NOW THAT RUSSIA HAS IT**  
U.S. Is 4 Years Ahead But Plans Defer



# Мы умели предугадывать будущее...

**«Думая о хорошем  
и строя планы о хорошем, надо  
всегда помнить и о том, чтобы  
мы ничего плохого не натворили».**

*Ю.Б. Харитон*



**Наши изделия  
современны. Мы  
полны уверенности,  
что наш боезапас  
надежен и по-прежнему  
может сокрушить  
любого неприятеля**

**Н**

аша беседа с **Радием Ивановичем Илькаевым** началась в музей-квартире Ю.Б. Харитона в Сарове, а продолжилась в Москве в музее Е.П. Славского — в здании «Росатома» на Большой Ордынке. И это символично: речь шла о нынешнем состоянии ядерного оружия, той роли, которую оно играет в жизни России сегодня, а без кратких возвращений в прошлое, к людям, чьи имена отражены в названиях музеев, говорить о нем невозможно.

### **Саров**

— Мы сейчас находимся в кабинете Ю.Б. Харитона, в котором вы когда-то произнесли фразу, которая мне запомнилась: «Школа Харитона — это надежность». Сегодня вы занимаете пост, который много десятилетий принадлежал академику Харитону, а потому я хочу спросить: для вас и для коллектива та фраза по-прежнему актуальна?

— Люблю повторять несколько мыслей Юлия Борисовича Харитона. Первая: «Мы должны знать в десять раз больше, чем нам нужно сейчас». И вторая: «Думая о хорошем и строя планы о хорошем, надо всегда помнить и о том, чтобы мы ничего плохого не натворили». Я всегда это помню и стараюсь учитывать в своей работе.

Наш институт создавался замечательными учеными. Научные исследования были в основе той работы, которые здесь велись по атомному проекту. Культ знания, уважение к ученому, к специалисту

любого ранга и возраста — все это Юлий Борисович привил всем сотрудникам ядерного центра. Эти качества «школы Харитона» у нас сохранились, и благодаря этому у нас очень хорошо идут как фундаментальные, так и прикладные исследования. Наш институт всегда выполнял — и продолжает это делать — все задачи, которые ставит перед нами руководство страны. И сейчас, когда возникает что-то новое и серьезное, в первую очередь обращаются к нам. Мне кажется, это лучшее доказательство того, что научная школа Харитона продолжает работать, причем весьма успешно. Что касается надежности, то для Юлия Борисовича это было самым высшим приоритетом. Его никогда нельзя было уговорить подписать отчет, если в нем была какая-то неясность. Он отдавал распоряжения только тогда, когда был уверен в их надежности и верности. Для атомной отрасли, для создания ядерного оружия это было необычайно важно. Надежность и безопасность — основа тех технологий, которые у нас есть.



Знаменитый «Красный дом» в Сарове — бывшие «Новые гостиницы» Саровского монастыря, в которых до настоящего времени располагается Управление РФЯЦ-ВНИИЭФ. В этом доме в 1947 г. жил и работал Ю.Б. Харитон.

— У обывателя существует представление: мол, сделали бомбу, заряд, и этого вполне достаточно. Зачем постоянно возиться с ними?

— Не только обыватели, но даже специалисты, которые напрямую не занимаются ядерным оружием, тоже могут задавать такие вопросы. Вернемся к тем временам, когда между двумя сверхдержавами было противостояние. Практически все роды вооруженных сил были оснащены

ядерным оружием. Это десятки типов зарядов и десятки типов боеприпасов. Более того, когда идет соревнование по весу, по габаритам, другим показателям — живучести, мощности и т.д., каждая сторона старается не отстать, а по возможности быть впереди. Мы ведь знали, каким арсеналом располагали наши потенциальные противники.

— Мы их догоняли?

— Могу твердо сказать: Советский Союз и ученые нашей страны соревнование не проиграли. По существу, боеприпасы мы всегда делали «в ответ», т.е. не были инициаторами гонки вооружений. Но отвечали очень достойно, ни в чем не уступали продукции, которая была в Соединенных Штатах.

Когда мы создавали ядерное и термоядерное оружие, договорились, что будем конструировать наши изделия на умеренных параметрах, т.е. не выбирая самые последние запасы. И поэтому наши изделия современны. И сейчас у нас есть полная уверенность, что наш боезапас надежен и по-прежнему может сокрушить любого неприятеля.

— И как долго эта «современность» может сохраняться?

— Простого ответа быть не может, т.к. речь идет об очень сложных конструкциях. Да, применяются испытанные заряды, но всю неядерную часть никто не мешает совершенствовать — делать боеголовки более «умными», «интеллектуальными», безопасными и т.д.

— «Умные боеголовки», что это такое?

## Юлий Борисович Харитон (1904–1996)

Выдающийся советский и российский физик-теоретик и физикохимик.

Академик АН СССР, доктор физико-математических наук. Создатель

ядерного щита Советского Союза.

С 1946 г. — главный конструктор и научный руководитель КБ-11

(Арзамас-16) в Сарове. Трижды Герой Социалистического Труда.

Лауреат нескольких государственных премий СССР.



— Ситуация следующая: вы прекрасно понимаете, что радиус поражения — это кубический корень из мощности. И поэтому для того, чтобы серьезно увеличить эффективность, нужно сильно увеличивать мощность. А лучше не ее увеличивать, а повышать точность, что гораздо эффективнее. И все это можно сделать за счет неядерных частей, путем увеличения точности всех систем.

### Москва

**— То будущее, что уже наступило, родилось именно в этом кабинете, где хозяином на протяжении трех десятилетий был легендарный Ефим Павлович Славский — руководитель советской атомной отрасли. Однажды он мне сказал, что мы тратили средств намного меньше, чем американцы. Причем не только на атомный проект, но и на космос, ракетную технику. Деньг намного меньше, а уровень приблизительно одинаков. Как это удалось сделать?**

— Да, это правда, средств мы тратили существенно меньше. Столько, сколько позволяла нам экономика. Но было еще требование жизни: стране нужно было ядерное оружие. И мы это прекрасно понимали. Тут включились и энтузиазм, и мозги. И, конечно же, все делалось исключительно рационально, т.е. то, что необходимо. Например, та же вычислительная техника у нас была примерно раз в десять менее мощной, чем у них. Мы

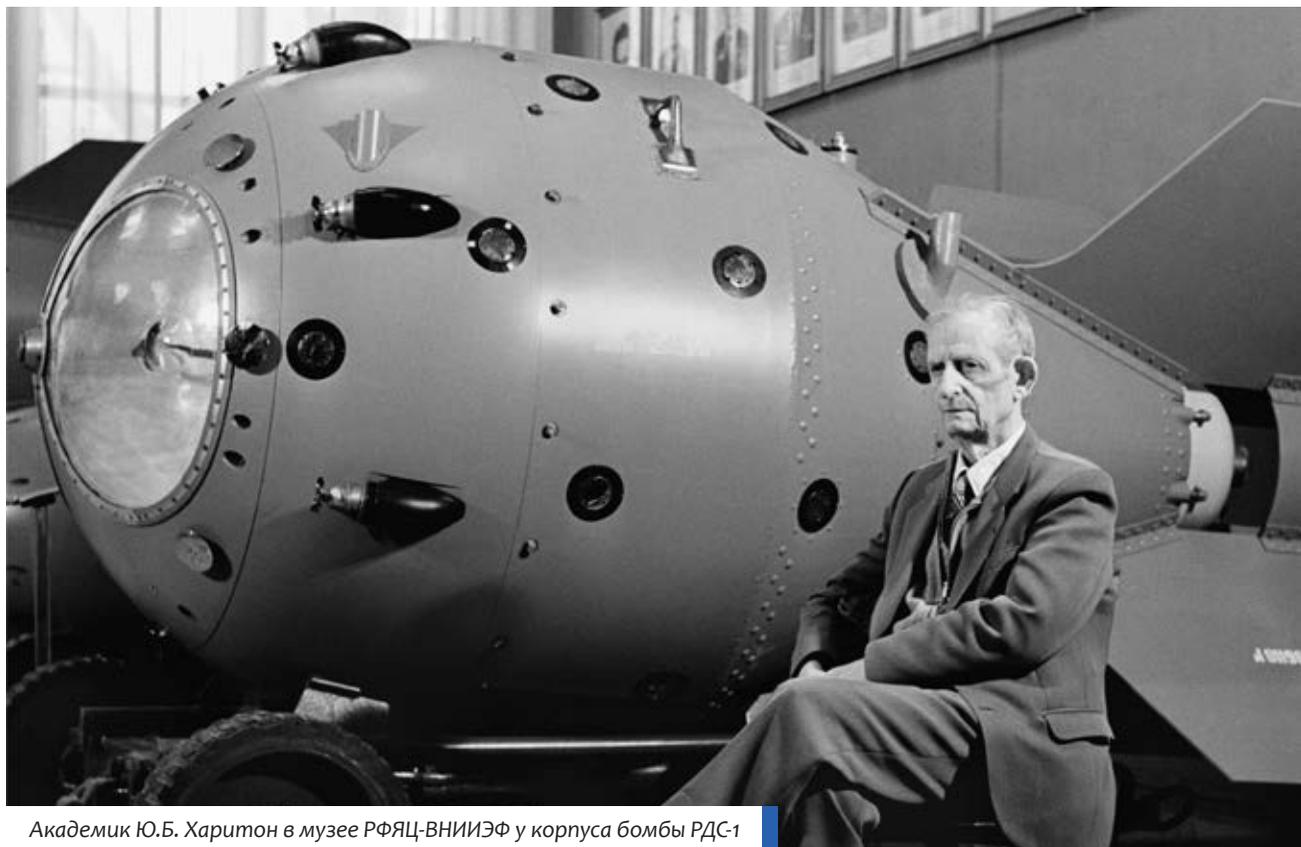
говорили: «Нормально, компенсируем это лучшим программным продуктом, более тщательным созданием физических моделей» и т.д. Мы не копировали то, что они делали, а добивались реализации своих собственных идей. А это всегда бывает и дешевле, и качественнее, и надежнее.

**— Федеральный ядерный центр России — крупный научный центр, соизмеримый по своим масштабам с отделением академии наук. Надежность и эффективность оружия — бесспорно, ваша главная задача. Но я знаю и видел, что вы занимаетесь не только ядерными «изделиями», но и большой наукой. Нельзя ли рассказать об этом подробнее?**

— В нынешних условиях все перенесено в научные лаборатории, т.к. ядерные полигоны «молчат». Я бы сказал, что впервые в мире делается очень своеобразный эксперимент. Физику говорят: «Послушай, ты свою продукцию теперь проверять не должен, но обязан гарантировать ее стопроцентную надежность». Как это можно сделать? Единственным способом: получать с каждым годом все больше и больше знаний, выяснять физические тонкости, проверять их в различных экспериментах — газодинамических, электрофизических, лазерных, облучательных на ускорителях и т.д. Таким образом, центр тяжести по подтверждению надежности перемещается в научные лаборатории. И поэтому нам нужно строить модели очень сложных физических явлений. Причем гораздо более точные, чем для ядерных испытаний. Надо иметь математические программы более мощные и прецизионные, чем те, которые мы использовали при подготовке ядерных испытаний. Прежних знаний для этих программ не хватает. Поэтому мы должны строить новые установки — физические, лазерные, электрофизические, газодинамические и т.д. — и на них проводить эксперименты. Если мы говорим серьезно о поддержании надежности оружия в течение многих десятилетий, в первую очередь необходимо развивать науку.

## Ефим Павлович Славский (1898–1991)

Советский государственный и партийный деятель, один из основателей и руководителей отечественной атомной промышленности и ядерной индустрии. Трижды Герой Социалистического Труда. 1957–1986 гг. — министр среднего машиностроения СССР.



Академик Ю.Б. Харитон в музее РФЯЦ-ВНИИЭФ у корпуса бомбы РДС-1

**— И вы это делаете?**

— Конечно, но не так быстро, как хотелось бы. Желательно, чтобы наша научная программа была гораздо мощнее. Когда президент страны В.В. Путин был у нас, мы обсудили с ним этот вопрос. Он обещал нам полную поддержку. Сейчас самое главное, чтобы нижестоящий чиновничий отряд не «замотал» это очень важное решение президента.

**— Чем вы гордитесь как научный руководитель ядерного центра?**

— У нас есть очень хорошие научные программы. На общем собрании Российской академии наук ее президент В.Е. Фортов рассказал о двух направлениях, по которым получены интересные данные по сжимаемости газов, причем при сверхвысоких давлениях. Такие эксперименты проводятся только у нас в Сарове. Или, например, получены очень важные результаты по новым типам лазеров, которые тоже представляют собой мировое достижение.

**— Хотелось бы что-нибудь обыденное — для всех нас, простых людей. Есть такие примеры?**

— Нынешняя промышленность без моделирования и расчетов жить не может. Если фирма разрабатывает сложную технику, она ничего не сможет сделать без расчетов на самых мощных ЭВМ. Наши математики создали несколько программных продуктов мирового уровня. И теперь говорят всем пользователям промышленности, в том числе оборонной, поскольку оборонной промышленности такой программный продукт из-за границы не продают: «Пожалуйста, берите, в несколько раз

дешевле будет... Если нужно, окажем помощь и обучим специалистов». Это все мы сделали в Сарове. Я считаю, что эта работа — хороший вклад в нашу промышленность. Думаю, через некоторое время будет поголовное использование наших программ. Пока ими пользуется около 50 предприятий. А скоро будут использовать тысячи, потому что без этого программного продукта мы нашу промышленность до мирового уровня не доведем.

**— Было время, когда мы инструменты для хирургов выпускали...**

— Мы сейчас создали технопарк, в котором хотим реализовывать конкретные производства. Не эксперименты проводить, а производить востребованную продукцию, которую немедленно покупают. Почему это нужно? Да потому, что в нашем городе уже проживают 93 тыс. жителей. Мы должны создавать рабочие места хорошего уровня с нормальной зарплатой, чтобы не только ВНИИЭФ жил и расцветал, но и Саров жил полноценной жизнью. Например, недавно начали выпускать новые материалы для строительства. Меня поразило, что предстатели нескольких фирм сразу приехали и заключили контракты на годы вперед. Или запорную аппаратуру стали делать мирового уровня — для атомных и неатомных электростанций. То есть помимо научных исследований мирового уровня есть и вполне практические промышленные достижения. Мы хотим, чтобы наш технопарк приносил пользу не только Сарову, но и всей промышленности Российской Федерации.

**— Вспоминаю, как 25 лет назад шел разговор в Сарове о том, как жить в будущем. И решили,**

**что примерно 30% — создание военной техники, а остальное — гражданская продукция. Изменились ли эти цифры?**

— Суть не в цифрах! У нас же есть военная программа, и она частично финансируется через «Росатом» и Министерство обороны. Безусловно, в основном эти средства мы тратим на оборону. А вот всю гражданскую продукцию мы решили проводить через технопарк. Мы ничего не придумывали сами, просто позаимствовали кое-что из того, что делается за границей. Крупные университеты там обычно так поступают. Государство тратит деньги на то, чтобы создать инфраструктуру, после чего технологии, которые изобретаются в этом университете, переносятся в технопарк и он уже занимается их доведением до ума и коммерциализацией. Мы решили пойти именно таким путем. Думаю, это более разумно.

**— Из нашего разговора можно сделать два неожиданных вывода. Во-первых, выяснилось, что запрет на испытания ядерного оружия приносит пользу Сарову. Во-вторых, хорошо, что вы ездили за рубеж, обменивались с американцами информацией: вы изучали положительный опыт, чтобы потом его использовать у себя.**

— Я очень жалею, что международное сотрудничество свернулось. Ученых и специалистов-оружейников по ядерным технологиям в мире очень мало. Общение необходимо для того, чтобы обмениваться именно научными исследованиями, результатами. Я считаю, что система защиты и охраны знаний, технологий и результатов у нас организована превосходно. И тут никакой опасности нет. Но возврат к прошлому...

**— К холодной войне?**

— Да. Я не буду давать оценок, пусть это делают политики. Конечно, это печально.

**— Помню, американцы приезжали в Саров...**



Ю.Б. Харитон и Р.И. Илькаев

## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### РАДИЙ ИВАНОВИЧ ИЛЬКАЕВ

**Академик РАН, научный руководитель Российского федерального ядерного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной и ядерной физики» (Саров).**

- Окончил физический факультет Ленинградского государственного университета.
- В 1961 г. поступил на работу во ВНИИЭФ в Арзамасе-16 (ныне Саров).
- С 1996 г. — директор Российского федерального ядерного центра ВНИИЭФ.
- В настоящее время — научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ.
- Ведущий специалист в областях теоретической и экспериментальной ядерной физики, связанных с созданием ядерного и термоядерного оружия.
- Автор более 550 научных трудов и изобретений.
- Заслуженный деятель науки РФ, лауреат государственных премий СССР и РФ.
- Лауреат премии Правительства РФ.
- Награжден орденами Почета и «За заслуги перед Отечеством» II и III степени, золотой медалью РАН им. А.Д. Сахарова. Получил благодарность Президента РФ. Удостоен награды РПЦ — ордена Серафима Саровского I степени.

— ...и ничего страшного не происходило. Причем обсуждали и серьезные дела, скажем, создание системы учета и контроля делящихся материалов. В советское время была прекрасная выучка персонала, все исполнялось абсолютно четко, качественно и в срок. И поэтому каких-то серьезных инцидентов с ядерными материалами у нас не было. Но когда мы перешли на другой экономический формат, потребовались технические меры учета и контроля. И в этой части общение с американцами было очень полезно, поскольку они стали гораздо раньше задумываться об этой проблеме. Были очень хорошая совместная работа и большая обоюдная польза. Или, например, хранение делящихся материалов. Надо было внедрять технические средства, в том числе создание разумно обоснованных хранилищ. Вместе работали, создавали их, что принесло огромную пользу нашей стране. И никто не беспокоился, что кто-то может изъять или похитить какую-то часть делящихся материалов у Российской Федерации. Задача была решена великолепно.

**— А сегодня в этом плане мы можем быть спокойны?**

— Да. Абсолютно!

Беседовал Владимир Губарев



От революции  
**К ЭВОЛЮЦИИ**



**«Ученым, которые участвовали в создании атомного оружия, не хотелось остаться в истории Геростратами, создавшими оружие уничтожения».**

Заместитель директора НИЦ «Курчатовский институт» доктор технических наук, профессор

**Ярослав Игоревич ШТРОМБАХ**

**П**ервопроходцем работ в ядерной энергетике в нашей стране всегда был и остается Курчатовский институт. О проблемах, истории и перспективах мирного атома мы беседуем с заместителем директора НИЦ **Ярославом Игоревичем Штромбахом**.

**— Насколько сложно было осуществить научно-технический прорыв в гражданской энергетике в связи с появлением возможности мирного использования энергии атома? Ведь в Советском Союзе было достаточно и нефти, газа, угля, зачем надо было влезать в такой экономически тяжелый и тогда, наверное, экономически неоправданный проект?**

— Я полагаю, ученым, которые участвовали в создании атомного оружия, не хотелось остаться в истории Геростратами, создавшими оружие уничтожения. Хотелось свои знания, энергию, ум направить на пользу человечеству. Деятельному, творческому, позитивному человеку думать о том, что его плоды его труда будут убивать людей, не очень приятно — хочется как-то это компенсировать. Вероятно, наши ученые, получив первую за пределами США цепную реакцию и начав ее реализовывать на аппаратах для наработки плутония, создания атомной бомбы, думали и о том, как применить ее во благо.

Первая в мире атомная станция была проектом, который позволил об этом заявить во всеуслышание на весь мир. В то же время тип реактора, который был установлен на первой АЭС, не стал магистральным направлением развития атомной энергетике.

В то время Советский Союз и весь мир занимались созданием атомных подводных лодок. После ряда проб и ошибок направление водо-водяных реакторов в подводных лодках стало основным. В это же время оно стало основным направлением и в гражданской атомной энергетике.

Довольно долго это направление было крайне закрытым, у нас в Курчатовском институте ученые зачастую не знали о том, что делается в соседней лаборатории. В этих условиях руководители советского атомного проекта — великие Курчатов и Александров — были теми, кто осуществлял связь между военной и гражданской его сторонами. Например, когда какие-то решения принимались по гражданским водо-водяным реакторам



Ленинградская АЭС

(ВВЭР), Анатолий Петрович Александров часто говорил: «Делать надо вот так». И, ничего не объясняя, добавлял: «Я знаю, ребята. Знаю, поверьте. Вы не сомневайтесь». Он действительно знал, потому что уже проходил это при создании реакторов для атомных подводных лодок. Поэтому было очень важно, что Курчатовский институт работал как над созданием военной атомной техники, так и над гражданскими реакторами, которые должны были стать основой атомной энергетики.

Курчатов очень жестко продвигал эти направления. Решение о строительстве двух новых станций — Нововоронежской и Белоярской — было принципиальным, принятым на уровне правительства, ЦК КПСС. В 1955 г. Курчатов дал поручение подготовить техническое задание на создание водо-водяного реактора. Год спустя поручение по разработке станции на основе такого реактора было направлено заместителем министра среднего машиностроения Е.П. Славским трем организациям: Курчатовскому институту, Ленинградской проектной организации, и ОКБ «Гидропресс».

Когда уже в 1960-х гг. было принято принципиальное решение активно развивать атомную энергетику, выяснилось, что проблема производства корпусов реакторов упирается в имеющиеся возможности наших заводов тяжелого машиностроения. Единственный в то время Ижорский завод не мог обеспечить такую широкую программу. Тогда внимательнее присмотрелись к реакторам

канального типа, которые уже использовались для производства плутония. Был создан проект реактора большой мощности, РБМК. С 1971 г. реакторы первого поколения на основе реактора ВВЭР пошли в серию: Нововоронежский реактор, затем Кольский. Приблизительно одновременно были запущены РБМК на Ленинградской атомной станции. Началась эра большой атомной энергетики в СССР.

### Для чего нужны спички?

— Почему же за столько лет в атомной энергетике так и не удалось достичь параметров, которых сумели добиться в тепловых электростанциях?

— Не согласен. По КПД атомные станции сейчас близки к 38–40%, и я не думаю, что в тепловой энергетике он намного выше. Мощность сдерживается большими капитальными вложениями, которые требуются при строительстве АЭС. Построить станцию на газе легко, но после этого надо жечь газ в огромных объемах. Атомная станция забирает большие деньги на этапе создания, зато у нее достаточно дешевая топливная составляющая.

— С другой стороны, нефти и газа у нас много, а урана — мало.

— Опять не согласен. В сумме все ископаемые энергоносители, — нефть, газ, уголь и все, что может гореть и превращаться в энергию, включая леса, — составляют около 3% запасов энергии, которые сегодня находятся на нашей планете. 97% ее приходится на два изотопа — уран-238 и торий-232. Если искусственно не ограничивать население Земли, то надо думать о глобальных запасах. Сегодня таковые — уран и торий.

— Но надо говорить не просто об уране, а об уране по экономически приемлемой цене.

— А здесь — согласен. Многие специалисты говорят, что мы атомные реакторы топим спичками. И это правда. Мы сегодня находимся на начальной, достаточно простой стадии развития энергетики — стадии открытого топливного цикла. Делящиеся изотопы, которые в нем используются,

**Чернобыль, Три-Майл-Айленд, Фукусима — это наша плата за реакторы на тепловых нейтронах. К счастью, эта плата обошлась без грандиозных человеческих жертв**



На гермозоне Ростовской АЭС

уран-235 и плутоний-239 — это спички, которыми можно разжечь более дешевое и имеющееся в изобилии топливо. В перспективных быстрых реакторах может гореть и уран-238, а торий-232 можно конвертировать в уран-233.

В задачи Курчатовского института входит разработка стратегии развития атомной энергетики. По нашей оценке, открытый топливный цикл будет эффективен приблизительно до границы 2050 г., если мы начиная с 2030 г. станем его интенсивно замыкать.

— **Что значит «замыкать»?**

— Использовать уран-238, а в будущем и торий-232 как резерв для получения делящегося изотопа, на котором можно создавать критические массы, сжигать имеющиеся в большом количестве запасы урана-238 и другие изотопы, способные захватывать только быстрые нейтроны.

Разработанная нами стратегия развития сегодня рассматривается в «Росатоме» наряду с другими. Она предусматривает сближение двух основных направлений: развитие реакторов на тепловых нейтронах и создание реакторов на быстрых нейтронах. Последнее представляется очень заманчивым, но надо честно признаться, что до сих пор промышленной технологии на основе таких реакторов не создано. В рамках проекта «Прорыв» рассматриваются наиболее продвинутые на сегодня реакторы с натриевым охлаждением, предлагается реактор со свинцовым охлаждением. Но это еще

не технологии, это конструкции, которые должны быть технологически отработаны и проверены на безопасность и эффективность.

### Цена удачи

— Чернобыль, Три-Майл-Айленд, Фукусима — это наша плата за реакторы на тепловых нейтронах. К счастью, эта плата обошлась без грандиозных человеческих жертв.

— **Но, безусловно, удар по имиджу и доверию к отрасли был нанесен грандиозный.**

— Людей очень пугает атомная энергетика. Я всегда отвечаю на это так: «Вспомните индонезийское цунами, которое унесло 300 тыс. жизней. Что, разве люди ушли с побережий океанов?» А вероятность повторения катаклизма очень высокая. В океане случаются землетрясения, возникают цунами, но люди возвращаются на побережье, потому что там жить лучше, большие запасы рыбы, белка и всего остального.

Или возьмем аварию 1984 г. в Индии, на химическом заводе в Бхопале, тогда 3 тыс. человек погибли сразу и 15 тыс. впоследствии. И что, химию уничтожили? Нет. Но над атомной энергетикой всегда висит гриб ядерного взрыва, поэтому она кажется страшной. Мы должны к этому относиться жестко, но без истерики. Поэтому, когда мы спорим с противниками ядерных технологий, говорим, что технологии ВВЭР оплачены Три-Майл-Айлендом и Фукусимой.



Установка турбины на Нововоронежской АЭС-2

— **А канальные реакторы большой мощности — Чернобылем?**

— Принято решение РБМК не развивать. В 2031 г. из эксплуатации будет выведен последний. Но пока они дают у нас половину всей атомной электроэнергии.

— **Мир заплатил за безопасность водо-водяных и канальных реакторов авариями. Но ведь переход на реакторы на быстрых нейтронах — это революция. Не придется ли нам и за нее тоже платить подобными трагедиями?**

— Поэтому мы и призываем двигаться в этом направлении с большой осторожностью, уделяя пристальное внимание возникающим проблемам.

— **Сейчас много говорят о реакторах с «естественной безопасностью»...**

— Мы в Курчатовском институте такое понятие не признаем. Есть внутренне присущий системе уровень безопасности — физические принципы, заложенные в реактор, которые понижают риск возникновения критических ситуаций. Никакой естественной безопасности нет и быть не может. Поэтому этот путь — превращения идеи в технологию — должен быть пройден абсолютно осознанно и достаточно эволюционно.

В ВВЭР надо более рационально использовать топливо, ужесточать спектр. По нашим оценкам, расход урана в этих реакторах можно сократить на треть, а коэффициент воспроизводства топлива довести до 0,8. То есть на 100 сожженных делющихся ядер урана-235 будет нарабатываться до 80 ядер плутония-239. Тогда можно будет говорить о замыкании топливного цикла даже в реакторах на тепловых нейтронах.

— **Такое возможно?**

— Да, и мы работаем в этом направлении. Если к таким «доработанным» ВВЭР добавить равновесное число реакторов на быстрых нейтронах, можно будет замкнуть топливный цикл и в течение многих десятилетий использовать уже добытый и накопленный уран-238. Назовем это эволюционным путем дальнейшего развития атомной энергетики.

— **Но можно слышать, что водо-водяные реакторы достигли предела своих технических возможностей. Вложения в их разработку и строительство окупаются уже с большим трудом.**

— Нет, там тоже есть еще перспективные пути развития. О первом направлении я уже сказал, и мы называем его эволюционным. Другое находится в рамках так называемого четвертого поколения. В его составе рассматриваются еще более радикальные варианты развития водо-водяных реакторов — так называемый реактор на сверхкритических параметрах. Он работает при гораздо более высоких температурах и давлениях — вода на выходе там достигает температуры выше 500° С. Это направление мы называем революционным для ВВЭР.

— **Перегретый пар?**

— Не пар, а именно вода! Под сверхкритическим давлением — параметры, выходящие за пределы значений в таблицах Вукаловича (*таблицы свойств и состояния воды и водяного пара в широком диапазоне температур и давлений, созданы советским физиком М.П. Вукаловичем*



Смоленская АЭС

(1898–1969). — Примеч. ред.). Там можно получить и большую величину теплосъема, и лучшие физические параметры. Но это уже революционный путь совершенствования ВВЭР.

Сегодня наиболее реален эволюционный путь. В его рамках можно использовать уран-233, получаемый из тория-232. Такое решение значительно улучшит физику активных зон. Уран-233 как раз хорош для реакторов на тепловых нейтронах.

— **У вас от эволюции до революции метров сто...**

— Курчатовский институт не был бы Курчатовским институтом, если бы не предлагал революционные и эволюционные пути решения проблем. В свое время об этом говорил Курчатов.

После того как сделали водородную бомбу, как раз и появилось намерение укротить термояд. Уже тогда было понятно, что термояд — это много нейтронов, которые могут превращать не делящееся сырье в делящееся. Сегодня мы реконструируем наш «Токамак-15», превращаем его в прообраз термоядерного источника нейтронов. На таком источнике, как мы посчитали, можно будет эффективно наработать делящиеся изотопы даже при достаточно ограниченных мощностях самого устройства. Сняв с него гигаватт тепла, можно получить три тонны урана-233. При этом с того же гигаватта на быстром реакторе мы получаем всего 300 кг плутония-239.

— **Но у нас же еще нет термояда!**

— Именно поэтому такие устройства пока кажутся фантастическими. Но мир уже строит ITER. А мы изучаем физику более компактных, более приближенных к практическим задачам термоядерных источников нейтронов. Я думаю, что этот путь тоже будет играть в будущем значительную роль, потому что 97% энергии, про которые мы говорили, надо тоже еще как-то добывать.

## Над атомной энергетикой всегда висит гриб ядерного взрыва, поэтому она кажется страшной

— **Есть еще направление, которого мы не коснулись, — это АЭС с ядерными реакторами малой мощности на тепловых нейтронах. Какие перспективы у них?**

— Это весьма многообещающее направление, но его сдерживает одно очень серьезное обстоятельство: стоимость киловатт-часа значительно выше, чем на больших станциях. Реакторы средней мощности — «шестисотки» — уже вызывают вопросы, а реакторы малой мощности — тем более.

Это только кажется, что чем меньше станция, тем меньше проблем. Мини-АЭС имеет практически те же проблемы, что и большая, с точки зрения физической защиты, противоаварийных мероприятий, террористической опасности.

Очевидно, что малая энергетика нужна, но она нужна для специальных задач. Например, когда завозить большое количество дизельного топлива сложно или дорого, да и экологически накладно. Вот здесь небольшие атомные станции, несмотря на высокую стоимость, смогут успешно конкурировать и позволят решить многие проблемы золотодобытчиков, нефтяников и т.д. Полезными они окажутся и для военных, например на отдаленных



арктических станциях. Стоимость здесь отходит на второй план — важно, чтобы мини-АЭС выполняла свои задачи по обеспечению электроэнергией боевые установки.

Что касается создания транспортабельных малых АЭС, которые можно будет отдавать в лизинг развивающимся странам, то все аспекты этого вопроса должны прорабатываться с максимальной тщательностью, не в последнюю очередь с точки зрения нераспространения ядерных технологий. Но и здесь главный вопрос — снижение стоимости их постройки и эксплуатации.

### Дивный атомный мир

— В январе 2010 г. Министерство энергетики США создало независимую экспертную комиссию для изучения вопроса американского ядерного будущего. Два года спустя комиссия подготовила доклад, в котором говорится, что цикл надо замыкать, но пока у них для этого нет общепринятой технологии быстрых реакторов. Натриевый быстрый реактор у нас работает, и запускается новый БН-800. Здесь мы впереди всех. На этом направлении мы активно сотрудничаем с французами.

**— Есть такая богатая страна — Китай. Почему там решили развивать атомную энергетику не на базе наших ВВЭР, а взяли за основу AP-1000 фирмы Westinghouse?**

— Когда вы развиваете атомную энергетику, у вас постоянно идет борьба между стоимостью и обеспечением безопасности. До Фукусимы многие считали, что мы чересчур увлеклись вопросами безопасности. Тогда корейцы создали сильно удешевленные проекты, недостаточно, с нашей точки зрения, проработанные в плане безопасности. После Фукусимы вероятность строительства таких проектов сильно снизилась. AP-1000 — хороший

## В Турции мы строим четыре блока по принципу «строй — владей — эксплуатируй»

проект, но мне кажется, что вопрос превращения американского реактора в китайский не безупречен с лицензионной точки зрения.

В нашем проекте ВВЭР-ТОИ учтен весь предыдущий опыт. Это позволило создать реактор, наносящий минимальный ущерб окружающей среде. Размеры санитарной зоны при возможной аварии нам удалось уменьшить с 3 км до 800 м!

Долго дискутировался вопрос о ловушках расплава активной зоны: нужны они или нет? Именно у нас в институте Владимиром Асмоловым были реализованы проекты «Маска» и «Расплав». Когда на АЭС «Фукусима-1» расплавы из корпуса реактора ушли вниз, всем стало понятно, что ловушка — вещь не лишняя. То, что в китайских и индийских проектах мы установили ловушки, стало нашим большим экспортным преимуществом. Сейчас они предусмотрены во всех новых проектах.

Нам удалось завоевать хорошие позиции на мировой арене. Наглядный тому пример — Турция, где мы строим четыре блока по принципу «строй — владей — эксплуатируй». При этом мы проходим достаточно жесткую экспертизу местных надзорных органов. А вот французская *Areva*, выигравшая у нас тендер на строительство реактора в Финляндии, уже на семь лет отстает от графика,



Строительство энергоблока Нововоронежской АЭС-2

предусмотренного контрактом. Они никак не могут убедить Центр радиационной безопасности Финляндии (STUK) в безопасности своей станции. Мы надеемся, что проектируемая на площадке «Ханхикиви» российская станция с такими трудностями не столкнется.

— Если все пойдет так, как планируется, и у нас заработает замкнутый цикл, какова вероятность того, что к концу века 9/10 тепловой и электрической мощности в мире будут вырабатываться на ядерных реакторах?

— Надо смотреть, как в целом будет развиваться ситуация в мире. Об этом часто говорит наш директор Михаил Валентинович Ковальчук. Положение на энергетическом рынке круто изменилось с подъемом уровня потребления в тех странах, которые мы когда-то называли развивающимися. Это страны БРИКС. Индия и Китай вдвоем могут съесть столько энергии, что мы не напасемся. В этом случае, конечно, надо будет включать новые ресурсы. Возможно изменение моды энергопотребления: чтобы не бензин лить в машины, а, скажем, развивать водородные или электромобили. Ведь водород тоже может быть продуктом ядерной энергетики.

Энергетический рынок может стать очень емким. Сейчас мы находимся в стадии стагнации. Всерьез рассуждаем о солнечных батареях, ветряках и т.д. Но строить только на них благополучие 15 млрд человек, которые будут населять Землю к концу тысячелетия, конечно, невозможно. Нужны эффективные и дешевые источники энергии, такие как атомные станции. Я думаю, что про 90% говорить не стоит, но, когда органические ресурсы станут пищевыми (а такая ситуация при сохранении темпов прироста населения не за горами), мы нефть будем есть, а не сжигать. В этом случае атомная энергетика будет достаточно востребована.



## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### ЯРОСЛАВ ИГОРЕВИЧ ШТРОМБАХ

Доктор технических наук, профессор. Заместитель директора по научной работе НИЦ «Курчатовский институт».

- Родился в Ленинграде.
- Окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана.
- Научные интересы: атомная энергетика, реакторное материаловедение, радиационная физика твердого тела и радиационные нанотехнологии, новые материалы для атомной энергетики и промышленности, научно-техническая поддержка эксплуатации, модернизации и продления ресурса оборудования действующих АЭС.
- Профессор кафедры физического материаловедения Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». Член президиума, председатель научно-технического совета № 2 госкорпорации «Росатом». Член межведомственной рабочей группы Совета при Президенте РФ по науке и образованию. Президент Ядерного общества России.
- Автор более 100 публикаций в реферируемых изданиях и двух монографий.
- Лауреат Государственной премии Российской Федерации в области науки и технологий (2012).

#### NB!

— В 2012 г. вы получили Государственную премию. Вы — специалист по ядерному материаловедению. Недавно в России была разработана фантастическая сталь, позволяющая поднять срок службы корпусов реакторов до 100 и более лет. Я сопоставил эти факты. Это мы вам спасибо должны сказать?

— Не только мне. Но и мне тоже. Комплекс работ по корпусам реакторов, оцененный Государственной премией РФ, проводился специалистами трех организаций: ЦНИИ КМ «Прометей», Курчатовского института и ЦНИИТМАШ. В результате мы добились продления сроков службы корпуса с нынешних 30–40 лет до 60 лет. А это, поверьте, совсем не просто.

Второе, в чем как раз больше моего труда, — создание методов отжига материала корпусов реактора ВВЭР-1000. С их помощью можно поднять ресурс ряда проблемных корпусов до тех же 60 лет.

Третье — это та сталь, о которой вы говорите. Ее автор — ЦНИИ КМ «Прометей». Но мы (и институт, и я лично) принимали в ее создании непосредственное участие. Она продержится даже не 100, а 120 лет! ■

Беседовал Равиль Атжанов



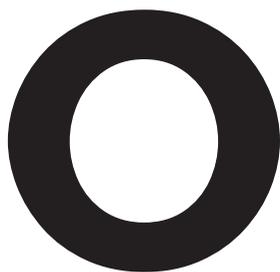
# Реакция безопасности



**«При нынешних темпах роста энергопотребления в мире ископаемые источники энергии на Земле истощатся уже через 100 лет. Поэтому альтернативы ядерной энергетике просто не существует».**

Первый заместитель генерального директора ОАО «Концерн Росэнергоатом» доктор технических наук, профессор

**Владимир Григорьевич АСМОЛОВ**



первых шагах мирного атома в СССР, о нынешнем дне и о перспективах российской ядерной энергетике рассказывает советник генерального директора госкорпорации «Росатом» доктор технических наук, профессор **Владимир Григорьевич Асмолов**, занимавший с 2003 по 2004 г. пост заместителя министра РФ по атомной энергии, а затем около десяти лет — пост первого заместителя генерального директора концерна «Росэнергоатом».

26 июня 1954 г. в нашей стране произошло без всякого преувеличения историческое событие. В 100 км от Москвы на территории сверхсекретной лаборатории «В» состоялся энергетический пуск первой в мире промышленной атомной электростанции. В 17:45, согласно записи в оперативном журнале, на турбину электрогенератора был подан пар, разогретый энергией, высвободившейся в результате деления атомных ядер. Впервые в истории человечества свет и тепло в дома принесла не аккумулированная энергия Солнца — будь то нефть, газ, уголь, энергия воды или ветра, — а укрощенная человеком энергия атомного ядра.

Начать, пожалуй, надо не с 1950-х гг., а немного раньше. Полыхает Вторая мировая война. Обеспеченные перспективой создания немцами ядерного оружия, Соединенные Штаты совместно с Великобританией и Канадой начинают активную разработку атомной бомбы в рамках Манхэттенского

проекта, кульминацией которого стала ядерная бомбардировка японских городов Хиросимы и Нагасаки. Руководство Советского Союза понимало, что для выживания страны необходимо в кратчайшие сроки овладеть энергией деления атомного ядра. Советский атомный проект стартовал в 1943 г. и, несмотря на послевоенную разруху и необходимость восстанавливать обескровленное войной народное хозяйство, на это были брошены все имеющиеся в распоряжении ресурсы. Решалась важнейшая первоочередная задача обеспечения безопасности страны, и в 1949 г. она была успешно выполнена: испытан в казахстанских степях первую плутониевую бомбу, СССР быстро ликвидировал атомную монополию США.

Занимаясь разработкой и совершенствованием ядерного оружия, Игорь Васильевич Курчатов и другие физики хорошо понимали, что ядерная энергия может стать не только разрушительным

оружием невиданной силы, но и практически неисчерпаемым источником энергии, способным решить проблему обеспечения энергетической безопасности страны. Здесь уместно вспомнить письмо Петра Леонидовича Капицы Молотову, датированное еще 1945 г., в котором он отмечает: «Необходимо использовать энергию деления ядер в мирных, культурных целях».

По самым оптимистическим прогнозам, при нынешних темпах роста энергопотребления в мире ископаемые источники энергии на Земле иссякнут уже через 100 лет. Поэтому альтернативы ядерной энергетике просто не существует. Несмотря на все протесты «зеленых» и прочих радикалов, атомные электростанции продолжают строить во многих странах, и во все больших масштабах.

С ростом числа атомных электростанций все острее встает проблема обеспечения безопасности ядерной технологии, т.е. проблема обеспечения безопасности и надежности их работы и проблема обращения с радиоактивными отходами. Авария на американской АЭС «Три-Майл-Айленд», а затем чернобыльская катастрофа заставили мировое ядерное сообщество уделить проблеме безопасности самое пристальное внимание.

Творцы советского атомного проекта никогда не сомневались в том, что из военного он перерастет в мирный. Сегодняшняя атомная энергетика унаследовала от советского атомного проекта практически все: уникальных специалистов, технологии, производство, знания.

Уже в конце 1940-х гг. были предложены первые варианты использования атомной энергии в самых разных областях. Впоследствии разрабатывались уникальные проекты атомных авиационных и ракетных двигателей, атомного локомотива и даже атомного танка. Из атомного проекта выплыли корабли-ледоколы, атомные подводные лодки, родились энергоустановки для космических аппаратов, гражданская ядерная энергетика. Конечно же, серьезного экономического обоснования объектов ядерной энергетике тогда не требовалось. Атомные станции были дороже обычных, мощности их были невелики. Безопасность, безусловно, была одним из приоритетов, но, пожалуй, не главным. А безопасность — это прежде всего база знаний. Чем больше ты знаешь о системе, тем легче спрогнозировать ее состояние в любой момент работы. Если чего-то не знаешь, необходимо инициировать исследования, иногда очень сложные и дорогие, чтобы это незнание восполнить.

### Каждый рубеж — главный

Авария на Три-Майл-Айленде стала первым звонком. Выброшенной наружу в результате потери теплоносителя и плавления активной зоны радиоактивности было относительно немного — всего

15 кюри. Гром прогремел семь лет спустя в Чернобыле. В результате аварии с резким ростом реактивности было выброшено в окружающую среду более 50 млн кюри радиоактивных материалов.

После нее пришло четкое осознание, что нужно не просто знать, как работает реактор, но иметь средства, позволяющие уверенно его контролировать в любом состоянии. Авариями с ростом реактивности управлять невозможно. Активная фаза аварии на Чернобыльской АЭС длилась всего четыре секунды. Такого типа аварии должны быть исключены физическими свойствами самого ре-



27 июня 1954 г. в подмосковном Обнинске дала ток первая в мире АЭС

актора. А вот протяженными во времени авариями с нарушением теплоотвода, такими как на Три-Майл-Айленде или в Фукусиме, управлять можно и необходимо. Для этого нужно неукоснительно соблюдать общие правила и регламенты, понимать принципы обеспечения безопасности и вообще досконально знать, что происходит в той или иной ситуации. А для этого, в свою очередь, необходимо иметь представление о том, как поведет себя реактор в экстремальных ситуациях и в аварийном состоянии. После аварий на Три-Майл-Айленде и в Чернобыле были проведены серьезные эксперименты, направленные на понимание процессов, которые сопровождают аварии.

В СССР одним из главных специалистов в этой области был мой учитель Виктор Алексеевич Сидоренко, ныне — член-корреспондент академии наук. Мы с ним разработали и возглавили программу исследований тяжелых аварий, изучали процессы перехода горения в детонацию, взрыв водорода, проблему удержания расплава в корпусе реактора и т.д. В 1987 г. в Семипалатинске на импульсном реакторе ИГР мы даже промоделировали маленький управляемый «Чернобыль»: взяли твэл из канального реактора большой мощности (РБМК) и посмотрели, как он разрушается. Теперь мы все досконально знаем о таких авариях и можем дать надежную гарантию того, что они никогда не повторятся.

### Задача на перспективу

Пока еще не ясно, насколько дорог будет уран в ближайшее время и сколько мы его найдем. На сегодня уже можно объективно утверждать, что энергетика, базирующаяся на реакции деления ядер тяжелых элементов, может обеспечить потребности человечества в любом обозримом будущем. Дорога, по которой мы идем, и все наши усилия направлены именно на это.

В будущем при замыкании ядерного топливного цикла по урану и плутонию мы придем к тому, что вопрос обеспечения ядерным топливом будет снят. Для того чтобы обеспечить это будущее, надо думать и работать уже сейчас.

На сегодня доля атомной энергетики в суммарном производстве электроэнергии в мире составляет около 17%, что явно не соответствует ее возможностям. Проблема обращения с отходами и отработанным ядерным топливом пока лишь усугубляется, потому что сейчас мы их только накапливаем. С переходом на замкнутый топливный цикл мы сможем решить эту проблему, сжигая в реакторах на быстрых нейтронах всякую дрянь, которую нарабатывают атомные реакторы. Фактически сегодня мы конструируем день завтрашний, когда ядерное топливо можно будет назвать безотходным возобновляемым источником энергии.

Безусловно, есть и другие возобновляемые источники энергии — ветер, солнце, приливы, биоэнергия. Но они привязаны к местности, дороги и в целом не способны покрыть глобальные потребности человечества. Я ни в коем случае не против солнечной или ветровой энергетики, но и тут надо научиться оценивать все плюсы и минусы. И тогда мы, может быть, поймем, что низкочастотный шум от ветряков — не есть хорошо; что, «замостив» пустыню Сахару солнечными батареями, мы спровоцируем климатическую катастрофу; что просто так забрать с какой-то территории огромное количество энергии солнца без последствий для окружающей среды не получится.

Если говорить об угле и газе, то и они по мере исчерпания станут слишком дороги. Хотя атомная энергия тоже не дешева, но собственно топливная составляющая в цене атомного киловатта невелика — всего 17–20% от себестоимости. Остальное — инвестиционная, капитальная составляющая. Она так велика потому, что сегодня мы очень серьезно заботимся о безопасности. Это обременение высококонцентрированного источника энергии, которое требует затрат. Любой новый реакторный блок, любая новейшая ядерная технология должны быть пропущены через фильеру знаний, доказывающую их безопасность. И безопасность эта должна строиться на принципе глубокоэшелонированной защиты. В первую очередь надо создать надежный щит от нарабатываемой в ходе ядерных реакций радиоактивности. Здесь предусмотрено сразу несколько барьеров, удерживающих опасность внутри: сама топливная матрица, оболочка твэла, первый контур, корпус реактора и, наконец, надежная защитная оболочка.

Кроме самих барьеров предусмотрены меры по обеспечению их целостности. Образно говоря, каждый барьер безопасности защищает группа солдат, которая ежесекундно готова к действиям. Главный принцип такой защиты: каждый барьер рассматривается как последний рубеж. Накопленная за десятилетия база знаний о работе реакторов — фундаментальная основа жизнедеятельности всей атомной отрасли России. А у нее есть надстройка — культура безопасности, и главный ее принцип — приоритет безопасности при всех обстоятельствах.

Как сделать работу реактора максимально безопасной, не поднимая его стоимость до небес? Часто говорят, что необходимо строить «реакторы с естественной безопасностью», в которых критические ситуации просто невозможны уже в силу их конструкции. Я этого не понимаю. Для меня безопасность реактора и его отдельных частей оценивается возможностью контролировать работу реактора и управлять ею в любой ситуации. Необходимо проташить новую разработку через фильеру глубокоэшелонированной защиты. Постулируй аварию, какой бы она маловероятной ни была, и исследуй пути ее развития. На каждом этапе докажи, что ситуация поддается контролю, что ты можешь остановить выброс радиоактивности на одном из барьеров безопасности.

Если корпус реактора в случае плавления активной зоны удерживает расплав внутри барьера, ловушку активной зоны можно убрать. Но сначала докажи, что удержит. Вот, с моей точки зрения, абсолютно безукоризненный подход.

### Столетний ресурс

Мало построить атомную станцию, надо обеспечить ее непрерывную безаварийную работу в течение всего жизненного цикла. Проследим всю его

цепочку. Для атомной станции нужно топливо. Нужны надежные топливные элементы определенного вида. Значит, нужна добыча, нужно обогащение, нужно производство твэлов, нужны конструкционные материалы оболочки и т.д. За каждым из этих элементов стоит огромнейшая работа.

Вот лишь один пример. Оболочка нашего тепловыделяющего элемента или твэла — это так называемый 110-й сплав: цирконий и 1% ниобия. Цирконий используется потому, что он практически прозрачен для нейтронов. Если температура оболочки твэла превышает  $1000^{\circ}\text{C}$  и есть контакт с паром, начинается пароциркониевая реакция с выделением большого количества водорода, как это произошло на АЭС «Фукусима-1». Смешиваясь с кислородом воздуха, водород взрывается, что при той же аварии мы и имели возможность наблюдать.

Сейчас уже есть проекты, позволяющие отказаться от циркония с сохранением нейтронной прозрачности. Например, проблему можно решить с помощью керамических материалов. Есть предложения сделать «сэндвичи», чтобы исключить взаимодействие циркония с паром. Это не какие-то далекие задумки, это вещи, которые сегодня серьезно обсуждаются и скоро начнут реализовываться.

Далее: у нас есть корпус реактора, радиационная стойкость и прочность материала которого определяют срок службы всего комплекса. Мощный поток нейтронов, непрерывно бомбардирующий корпус, вызывает радиационное изменение структуры его материала, которое ведет к резкому увеличению хрупкости и разрушению. На сегодня срок службы корпуса реактора составляет в среднем 60 лет. За последние пять лет был создан новый материал, способный выдержать поток нейтронов на порядок выше. Разработчики этого нового материала получили государственную премию. Даже при интенсивном облучении 100 лет такой реакторный корпус выдержит точно. А больше и не нужно. Тут важно другое: теперь мы можем не ставить в активную зону протекторы корпуса, что позволяет поднять мощность реактора.

Первые реакторы из нового материала будут запущены в 2019 г. на Курской АЭС-2. Здесь мы далеко впереди планеты всей.

Кроме корпуса есть большое количество внутрикорпусных устройств, которые тоже подвергаются нейтронному обстрелу. Поэтому по заказу «Росэнергоатома» начаты работы по созданию новой стали для таких элементов.



Купол энергоблока строящейся Нововоронежской АЭС-2

### Шаг за шагом

80% реакторов в мире сегодня — водо-водяные. Наибольший опыт мировая атомная энергетика накопила, работая именно с ними, и на сегодня они отвечают всем требованиям безопасности. Но подошло время переходить на новую ступеньку ядерно-энергетической лестницы.

Как-то руководитель Манхэттенского проекта генерал Лесли Гровс заметил, что «бумажный проект всегда прост, дешев, легок в исполнении, а любые проблемы в нем решаются ластиком и карандашом. Реальный проект никогда не строится в заложенные сроки, он всегда гораздо дороже, чем предлагают авторы. И если сделаешь что-то не так, исправить это чрезвычайно сложно». Для меня опыт, который накоплен сегодня при конструировании

и эксплуатации легководных реакторов, гораздо важнее любых — самых замечательных, лучших — предложений по обеспечению безопасности с использованием новых технологий. Я готов их поддерживать, но хочу быть уверенным, что эта их «безопасность» не бумажная, а реальная.

Решающий фактор здесь — степень обоснованности. Какую процедуру должно пройти новое топливо, чтобы получить сертификат безопасности для работы в коммерческих реакторах? Нужно испытать его на стендах, затем в исследовательских реакторах. Потом загрузить в реальный реактор одну кассету или один твэл. Нужно, чтобы оно там проработало необходимый период времени. После этого его нужно выдержать лет пять его в бассейне, чтобы можно было с ним работать, а затем отвезти в НИИ-ИАР и в горячих камерах посмотреть, какие у него свойства. Но таким образом мы обосновали лишь его безопасность при нормальной эксплуатации.

Затем мы должны взять кусок топлива уже выгоревшего. Загрузить его в исследовательский реактор, провести испытания, допустим, на реактивную аварию, подобную той, что была в Чернобыле, и посмотреть, какой у него предел разрушения. И так далее... Минимальное время для того, чтобы обосновать нововведения в топливо, — 15–20 лет. Но именно такой подход гарантирует нам отсутствие аварий.

Есть два пути. Можно сразу поставить перед собой и перед отраслью глобальную задачу, идти к ней всю жизнь и в конце сказать: «Увы, я так и не дошел». На мой взгляд, разумнее ставить краткосрочные задачи, чтобы получать удовлетворение от того, что достиг успеха, и ставить следующую задачу. Идти от одной близкой цели к другой. Может быть, именно таким образом и удастся решить глобальную задачу гарантированной безопасности и гарантированной эффективности атомной энергетики.

Подобного рода тактических задач великое множество. Сейчас мы имеем технологию, которую считаем надежной и безопасной, — доказательно безопасной. Ее можно сделать еще эффективнее, не снижая уровня безопасности, — существует даже так называемая программа снижения издержек. Обоснование безопасности подразумевает определенный уровень консерватизма или уровень запаса. Его можно оставить таким же, можно увеличить, можно уменьшить. Уменьшаешь запас — повышаешь производительность. Доказательное снижение консерватизма влечет повышение эффективности.

Как оптимально использовать топливо, как снизить его количество в реакторе, используя различные выгорающие поглотители, как обеспечить переход с гадолиния на эрбий... У меня сегодня на столе около 80 страниц проектов с обоснованиями той или иной новой технологии, которые можно реализовать уже в ближайшее время.

## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ АСМОЛОВ

**Доктор технических наук, профессор, первый заместитель генерального директора ОАО «Концерн Росэнергоатом».**

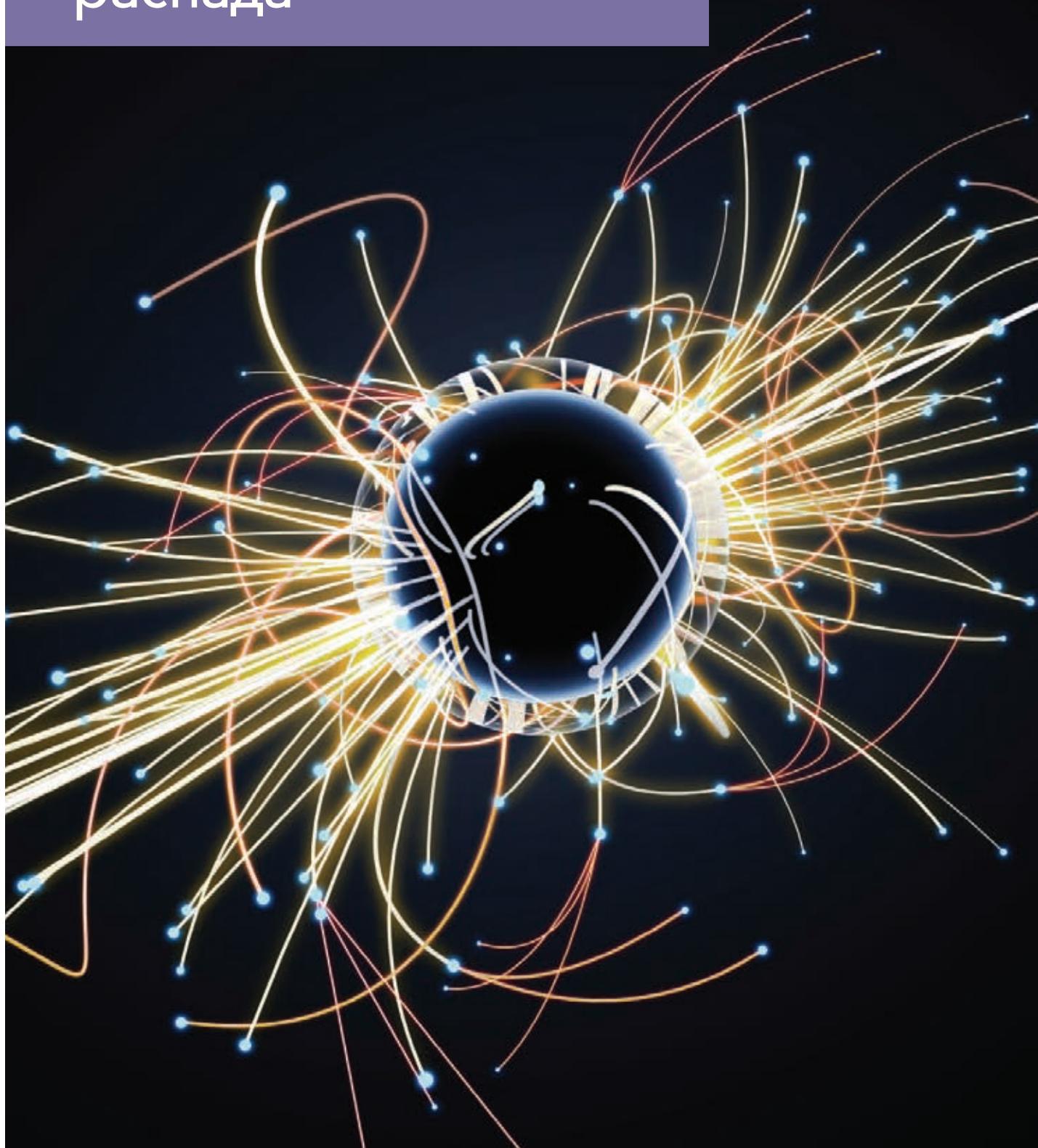
- Окончил Московский энергетический институт по специальности «Инженер-теплофизик».
- 1970–1992 гг. — инженер, старший инженер, начальник группы, начальник лаборатории, начальник отдела Института атомной энергии им. И.В. Курчатова.
- 1992–1994 гг. — директор Института проблем безопасного использования ядерной энергии РНЦ «Курчатовский институт».
- 1994–2003 гг. — директор РНЦ «Курчатовский институт» по научному развитию.
- 2003–2004 гг. — заместитель министра Российской Федерации по атомной энергии.
- 2004–2006 гг. — директор-координатор Российского научного центра «Курчатовский институт».
- 2006–2008 гг. — первый заместитель генерального директора — директор по научно-технической политике ФГУП «Концерн Росэнергоатом».
- С 2009 г. — первый заместитель генерального директора ОАО «Концерн Росэнергоатом».
- Член правления Ядерного общества России. Член Группы международных советников при генеральном директоре МАГАТЭ. Президент Всемирной ассоциации операторов, эксплуатирующих атомные электростанции (ВАО АЭС).
- Автор более 170 научных трудов.
- За участие в ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС Награжден орденом Мужества.

Но, конечно, есть и глобальная, стратегическая цель: переход на замкнутый топливный цикл на основе реакторов на быстрых нейтронах. Без этого у атомной энергетики нет перспектив. Главные требования к будущему атомной энергетики — гарантированная безопасность, эффективность, конкурентоспособность, отсутствие ограничений по топливу, проблем с ОЯТ и радиоактивными отходами и гарантия нераспространения ядерного оружия. Замкнутый цикл всем этим требованиям отвечает.

Я почти 50 лет отдал атомной отрасли и имел возможность посмотреть на нее с разных сторон. Я отчетливо вижу, что полный набор доказательств того, что атомная энергетика — не зло, а благо, отрасль имеет. ■

*Подготовил Валерий Чумаков*

Созидающая  
**Энергия**  
распада



**«С точки зрения концентрации ресурсов, постановки задач, перехода на новую платформу, наш “Прорыв” похож на первый атомный проект».**



Технология замыкания ядерного топливного цикла — это именно коммерческий проект. А тот, кто реализует коммерчески выгодные проекты, определяет и развитие рынка

Член правления госкорпорации «Росатом», заместитель генерального директора — директор Блока по управлению инновациями, доктор технических наук, профессор

**Вячеслав Александрович ПЕРШУКОВ**

**о новой платформе ядерной энергетики**

# **-В**аш проект называют «атомный проект – 2». Это намек на продолжение первого атомного проекта, его ремейк или что-то совершенно новое?

— Вещам, которыми занимаешься, всегда приятно давать красивые названия, но здесь ситуация гораздо серьезнее. Существующая платформа ядерной энергетики, которая в мире развита на базе реакторов на тепловых нейтронах, имеет ряд недостатков, которые заложены уже в технологии. У меня есть понимание, что развитие атомной энергетики на платформе легководных реакторов и использование тепловых нейтронов — это изначально промежуточная стадия. Надо переходить на другую технологическую платформу.

— **Можете пояснить какую?**

— Мировое ядерное сообщество ее определило давно. О ней говорили Энрико Ферми, Игорь Васи-

**Вещам,  
которыми  
занимаешься,  
всегда приятно  
давать красивое  
название**

льевич Курчатов, другие наши ученые — создатели ядерной энергетики. Использование нейтронов быстрого спектра — уникальная возможность, которая дана нам природой, — замыкание топливного цикла, когда плутоний, который нарабатывается в результате облучения урана, выступает новым топливом.

— **Вечный двигатель?**

— Я бы говорил более определенно: топливный ядерный цикл, позволяющий максимально использовать энергию ядерных сил, заложенных в материал природой. Сейчас в ядерной энергетике эра тепловых реакторов. Их проще создавать с точки зрения техники и оборудования, там не экстремально высокая температура, хорошо отлаженные термодинамические циклы пароводяных смесей.

Свойства пара и воды хорошо известны, а в остальном для энергетики нет принципиальной разницы, что и как сжигать, уголь или уран. Есть тепло выделяющий элемент — вот и все. Поэтому пошли по пути использования готовых решений.

— **Но ведь и быстрые реакторы тоже все это время развивали?**

— Здесь столкнулись с серьезными проблемами. В реакторах на быстрых нейтронах температуры в разы выше, там используются другие материалы, другие теплоносители. В этой области перед нами встали ряд принципиальных проблем, которые не удалось решить в XX в.

— **Что помешало?**

— Сложность физических процессов и появление новых вопросов. Для их решения необходима серьезная концентрация ресурсов. А есть среди них такие, которые под силу только консорциумам больших коллективов. Именно поэтому, с точки зрения как раз концентрации ресурсов, постановки задач, перехода на новую платформу, позволяющую справиться с мировой проблемой атомной энергетики, наш «Прорыв» похож на первый атомный проект.

**Актив**

— **Какие научно-технические ресурсы вам уже удалось привлечь?**

— Здесь опять уместно сравнение с первым атомным проектом. Там все делалось прямо и директивно: для решения конкретной задачи формировались отдельный институт или лаборатория, которые потом развились в огромные научно-производственные объединения. В «атомном проекте — 2» вся инфраструктура уже существует, и надо выполнить совершенно другую задачу: выделить ключевые компетенции, ключевых специалистов, ключевых лидеров в каждом из этих институтов и вовлечь их в проект.

— **Задача не менее, а может и более сложная, чем в условиях создания нового направления.**

— Конечно. Специалисты, как правило, заняты в других проектах, обросли коллективами, научными школами, привычками, друзьями, последователями. Убедить их, чтобы они перешли на новый проект, достаточно трудно. Тем более когда проект требует стопроцентного погружения. Гораздо проще продолжать тематику, где ты уже

гуру, научный руководитель, где к тебе проявляют соответствующий пиетет. А здесь надо новое создавать.

Несмотря на это, нам удалось сконцентрировать в «Прорыве» хорошие ресурсы. Сейчас в проекте работает более полутора тысяч человек, в него вовлечены десятки институтов. Это колоссальная ресурсная база.

— **Как удается ею управлять?**

— У нас для этого создана специальная система. В прошлом году мы как система управления получили первое место на конкурсе российского правительства «Проектный Олимп». Система работает и уже дает положительные результаты.

— **Вы сказали, что трудно выдернуть специалистов из коллективов. Может, лучше сделать ставку на талантливую молодежь?**

— Нам нужна ясность мышления и знания. Давайте посмотрим, сколько в науке формируются знания. Пять лет университета, пять лет — кандидатская, десять лет — докторская. 20 лет. Значит, нам нужно привлекать людей не моложе 45–50 лет. Они и есть «научная молодежь». Не в общепринятом смысле. Это творческая молодежь, которая отдала себя сложному процессу научного поиска или научно-технической деятельности. В российской науке есть демографический провал, это проблема известная. Есть проблема геронтократии, которая была характерна не только для СССР, она присутствует во все времена всем видам академий и науки. Нет в мире других примеров. На это есть понятная причина: мозг работает и накапливает опыт до последних дней биологического существования человека. У человека часто ноги уже не ходят, а мозг — ясный, светлый и работает не просто как часы, но как хронометр.

— **Но без молодой энергии и максимализма тоже трудно.**

— Трудно, поэтому и молодежь привлекаем. Если в России по научно-техническому комплексу средний возраст составляет примерно 50 лет, то для проекта «Прорыв» он все-таки меньше 45 лет.

Кроме того, мы специально создали кафедру технологий замкнутого топливного ядерного цикла, которая уже год работает в МИФИ. Отбираем на нее бакалавров и из других вузов: МИСиС, РХТУ, Физтех, Самарского университета. В прошлом году набрали первых 13 человек. В этом году планируем взять еще 10–15 человек.

— **Ядерный цикл — понятие междисциплинарное. По какой специализации на кафедру набираете?**

— В прошлом году делали акцент на радиохимиков. В этом намереваемся больше сконцентрироваться на переработке и генерации. Кафедра уже показала хорошие результаты. Я думаю, что за два-три года мы создадим межвузовскую кафедру и отберем людей, которые станут лидерами «Прорыва».

**Пассив**

— **Возвращаясь к проблемам, с которыми не смогли справиться в XX в. Какие уже решены, какие нет?**

— Все фундаментальные проблемы реакторов на быстрых нейтронах решены. Теорема существования доказана, в каком спектре она работает, нам понятно, топливные композиции примерно понятны.



Исследуем отработавшее топливо

— **Значит, надо строить!**

— А вот здесь уже возникают проблемы практические, пока не решенные до конца. И в первую очередь это ресурс. Нам нужны реакторы, которые будут работать значительно дольше 20–30 лет. У современных легководных реакторов ресурс определен до 50–60 лет, уже делаются корпуса, которые выдерживают до 100 лет. Но в быстрых реакторах совершенно другие требования к материалам. Сложно сказать, как будут себя вести современные материалы в контакте не с водяным паром, а с жидким свинцом на протяжении 30–50 лет. То есть остались вопросы техники и технологий. Надо нарабатывать опыт. А то, что уже накоплено, нужно реализовывать.

— **Почему не реализовали до сих пор?**

— Зачем? Посмотрим с точки зрения экономики и обычного бизнеса. У легководных реакторов пока не было дефицита ни по сырьевой базе, ни по мощностям хранения ОЯТ. Это хорошие машины. Они много поработали, доказали свою надежность.

— **На них бывают аварии.**

— Ну, бывают. Значит, разбираемся, усложняем, делаем дополнительные механизмы и барьеры безопасности. Вроде бы и зачем нам новая платформа?

— **Зачем тебе бросовки, когда ты еще коньки не сносил?**

— Не так радикально, но близко. Однако мир пришел к выводу, отличному от мнения экономистов и бизнесменов. ОЯТ — это не отходы, как ду-



Ускорители ЭГ-1 и ЭГ-2,5

мают многие, это облученное ядерное топливо, т.е. топливо, которое надо хранить и запустить его во вторичный оборот. Плутоний выходит во вторичный оборот. Пережечь его полностью за 100 лет гораздо выгоднее, чем организовывать захоронение на миллионы лет.

— **Разве возможно захоронить на миллион лет? Археологи говорят о максимальных сроках хранения без разрушения материала на уровне 10–20 тыс. лет.**

— А от нас требуют хранилища, которые можно законсервировать на миллионы лет, и это только развивает радиофобию. Значит, надо переходить к радиоэквивалентному хранению, когда на выходе мы получаем тот же уровень радиоактивности, что был на входе. Чтобы баланс в природе не менялся.

— **Такое возможно?**

— Доказано, что можно выйти на равновесный состав — когда мы подгружаем к уже облученному ядерному топливу примерно 10% обычного урана-238 и формируем свежее топливо для нового цикла. Постоянно подмешивая уран-238, мы обеспечиваем постоянное равновесное эквивалентное использование изотопов, которые мы достали из земли и которые в землю захоронили.

— **Но если цикл постоянный, что будет захоронивать?**

— Есть ВАО — высокоактивные отходы. Для них существуют технологии глубокого захоронения в гранитовых штольнях и т.д. А все энергетически полезное мы запускаем в цикл.

### 600 мегаватт тому вперед

— Если атомная энергетика хочет выжить в конкурентной борьбе с другими энергоресурсами, ее необходимо выводить на новый уровень.

— **Новая платформа сделает ядерную энергетику коммерчески выгодной?**

— И эффективной. Мы сейчас закончили цикл исследований, и теперь нам ясно, как сделать реактор на быстрых нейтронах коммерчески привлекательным: учетом замыкания топливного цикла и радиоэквивалентного захоронения, уменьшения запасов ОЯТ, исключения урана из топливного цикла. Чтобы он был экономически выгоден даже при нынешних ценах на газовые углеводороды.

— **Правильно будет сказать, что Россия в области быстрых реакторов сейчас мировой лидер?**

— Можно и не говорить, это неоспоримый факт. В США программа закрыта 40 лет назад, в Японии ничего подобного нет, в Корее тоже. Можно сравнить с Францией, там работы с быстрыми реакторами начались тогда же, когда и у нас. У них был «Феникс», который уже свое отработал. «Суперфеникс» проработал всего несколько лет. На нем не смогли достигнуть заданных параметров. Сейчас строят ASTRID — это фактически несколько улучшенный наш БН-600. Но они только строят, а мы БН-600 уже закрываем, потому что он отработал 30-летний цикл. У нас уже БН-800 на очереди.

— **Значит, Францию мы опережаем на 30 лет?**

— Тут стоит говорить не о годах, а о циклах. Мы впереди всех других стран на 600 МВт, потому что больше ни у кого быстрого реактора на 600 МВт нет.

— **Наверное, Китай старается догнать?**

— Китай реализовал очень интересный проект CEFR. Это наш БОР-60 — исследовательский реактор, который мы сейчас планируем к выводу из эксплуатации. Он у нас загружен на максимальное время, на уровне 80% — это колоссальный успех.

— То есть в Китае построили реактор для исследований в области быстрых нейтронов?

— Нет, *CEFR* не обладает инструментальной базой для проведения исследований. Он предназначен для обучения оперативного персонала работе с натриевыми петлями и натриевым теплоносителем. Задача очень важная, но недостаточная, на наш взгляд.

— США закрыли работы в области замкнутого цикла, мотивируя это проблемой нераспространения ядерного оружия. Как у нас решена эта проблема?

— Нераспространение ядерного оружия — это в первую очередь нераспространение плутония. В идеологию «атомного проекта — 2» и проекта «Прорыв» заложен прецизионный топливный ядерный цикл, в котором уран и плутоний разделять не требуется. Более того, плутоний там энергетического качества, он не годится для изготовления ядерного оружия. Мы еще собираемся туда подмешивать америций и кюрий, эта смесь не годится для обогащения и создания ядерного оружия. Тем самым принцип нераспространения не нарушается.

### Всем миром для всего мира

— Существуют глобальные научные проекты, продвигаемые в рамках международной кооперации, — БАК, *ITER*, *XFEL* и т.д. Почему и глобальную проблему перехода ядерной энергетики на такую перспективную платформу не решать сообща?

— На самом деле таких международных проектов совсем не много. И это достаточно сложная тема. Технологии с быстрым спектром — это технологии, которые обеспечивают высокую радиационную стойкость материалов. Они во всех странах относятся к категории двойных технологий. Тут возможно и космическое применение, и военное, и гражданское. Поэтому в этой сфере вопрос международной кооперации затруднен.

Второй вопрос еще более сложен. Новая платформа ядерной энергетики, которую мы строим, имеет сугубо коммерческий характер. *ITER* — некоммерческий реактор, это, по сути, научная платформа для изучения возможности управляемой реакции термоядерного синтеза. Так же как БАК — совершенно некоммерческий проект, направленный исключительно на научную, а значит, на общечеловеческую пользу. Технология замыкания ядерного топливного цикла — это именно коммерческий проект. А тот, кто реализует коммерчески выгодные проекты, определяет и развитие рынка.

Возникает вопрос: в условиях взаимодействия на разных рынках мы с другими странами конкуренты или партнеры?

— И конкуренты, и партнеры?

— Именно. Поэтому мы делимся со всем миром научно-технической информацией, обсуждаем

## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### ВЯЧЕСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ ПЕРШУКОВ

Доктор технических наук, профессор, академик РАН.

■ Член правления ГК «Росатом», заместитель генерального директора — директор Блока по управлению инновациями.

■ В 1980–1995 гг. работал в ЭНИН им. Г.М. Кржижановского.

■ В 2005–2008 гг. — технический директор компании *West Siberian Resources*.

■ С 2008 г. — генеральный директор ООО «СН-Нефтегаз».

развитие технологии замыкания топливного цикла, различные его аспекты. Ведутся разговоры и о коммерческой составляющей. Но сказать, что этот вопрос решен, было бы неправильно. У нас есть международный проект, в котором мы с французами пытаемся сделать совместный быстрый реактор, соединив наши компетенции. Непростая тема, работа над которой продолжается уже третий год. Если удастся, то это откроет путь к созданию кооперации для создания новой формы уже для всего человечества.

— Как это будет смотреться?

— Можно взять для примера ситуацию на рынке углеводородов. Все нефтяные и газовые компании были уверены, что у них все хорошо, пока не произошла «сланцевая революция». О запасах сланцевого газа было известно давно, но не было дешевых технологий его разработки. Когда эти технологии появились, рынок взорвался.

Вполне возможно, что такая же ситуация возникнет и в проблеме замыкания топливного ядерного цикла. Появятся технологии, которые позволят быстро коммерциализовать новое направление и сделают его альтернативой традиционной ядерной энергетике на легководных реакторах.

— Просто мягкой альтернативой — или жестким конкурентом?

— До жесткой конкуренции дело, скорее всего, не дойдет. Да и «сланцевая революция» антагонистической была по отношению только к тем, кто пытался монополизировать рынок. А по отношению к компаниям, которые интегрировались в области газового энергообеспечения, она была дружественной. Так же и ядерная энергетика, которая создана не для того, чтобы мешать людям, а для того, чтобы им помогать. ■

Беседовал Валерий Чумаков

Общий вид строящегося здания четвертого энергоблока Белярской АЭС с реактором БН-800

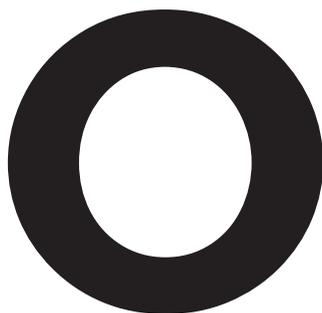


# Дело

на ближайшее  
тысячелетие



**Достигнув некоего уровня развития, технология уже не требует вложения средств, а наоборот дает отдачу**



перспективах развития атомной энергетики и путях решения актуальных задач в этой области рассказывает научный руководитель научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники (НИКИЭТ), научный руководитель проектного направления «Прорыв», доктор технических наук, профессор **Евгений Олегович Адамов**.

— **Евгений Олегович, зачем в ядерной энергетике понадобилась новая платформа?**

— Перевод ядерной энергетики на замкнутый топливный цикл, в основе которого реакторы на быстрых нейтронах, служит решению пяти ключевых проблем, первая из которых — безопасность, а вторая — конкурентоспособность. Нельзя забывать и о сырьевом обеспечении, решении проблемы ОЯТ и высокоактивных отходов, а также нераспространении делящихся материалов и оружейных технологий.

— **Разве быстрые реакторы выгоднее обычных, тепловых?**

— Вкладывая средства в какую-то новую технологию, вы сразу значительного эффекта не получите. Однако, достигнув некоего определенного уровня развития, технология уже не требует большого вложения средств, а наоборот дает отдачу. Потом

происходит насыщение ее возможностей и вы можете сколько угодно в нее вкладывать, но эффект будет опять очень маленький.

Ядерная энергетика в том, что касается тепловых и прежде всего водо-водяных реакторов, достигла насыщения возможностей. На них нельзя эффективно замкнуть топливный цикл и тем решить проблему топливообеспечения. Именно на АЭС с реакторами на тепловых нейтронах и водяными теплоносителями произошли наиболее крупные аварии (в США, СССР и Японии), которые нанесли отрасли небывалый репутационный ущерб.

Ядерная энергетика должна стать безопасной, оставаясь при этом конкурентоспособной. А наращивание барьеров безопасности, чем мы давно уже занимаемся, — это наращивание капитальной составляющей. Поэтому отрасль все время снижала свою конкурентоспособность.

Задача, которую мы ставим в проекте, — достичь конкурентоспособности не только по стоимости киловатт-часа, но и по капитальной составляющей с генерацией на органическом топливе.

— **Третья проблема, насколько я понимаю, — ограниченность запасов ядерного топлива. Четвертая — утилизация ОЯТ. А пятая?**

— Это проблема нераспространения ядерного оружия. Вся ядерная энергетика изначально есть продукт военной отрасли. На одних и тех же цен-

— Хотели. Когда Организацией по атомной энергии Ирана руководил вице-президент страны Голамреза Агазаде (1998–2009), он был готов присоединиться к нашему проекту. Американцы помешали. Первая договоренность с Министерством энергетики США по организации совместного проекта (тот же «Прорыв» по содержанию) решала целый спектр проблем: и безопасности, и нераспространения ядерных технологий, и экономической конкурентоспособности... Но тут из Госдепа через



Работы на высокопоточном исследовательском реакторе SM-3 в ГНЦ НИИАР

трифугах можно доводить обогащение по изотопу урана-235 до 4% для ядерного реактора, а можно — до 90% для ядерного заряда. Именно об этом «шестерка» сейчас у Ирана и спрашивала: «Вы, ребята, нарабатываете в своих центрифугах уран для ядерной энергетике или для оружия?» Кроме того, из ОЯТ можно выделить оружейный плутоний. Но быстрый реактор — всеядный, для него нет необходимости разделять уран, плутоний, другие минорные изотопы: надо из ОЯТ удалить продукты деления и вернуть делящиеся материалы для работы в активную зону.

Ни одна технология полностью не снимает проблему опасности распространения. Но можно технологически усилить режим нераспространения: отказаться и от выделения оружейно чистых урана и плутония в процессе переработки ОЯТ, и от обогащения уранового сырья (технологии разделения изотопов).

— **Без разделения не будет оружейного материала?**

— Совершенно верно, хотя это и не означает, что его нельзя получить другими путями. Не нужно исторически используемой технологии обогащения. Ирану можно сказать: «Господа, если вы не хотите под прикрытием ядерной энергетике создавать атомное оружие, стройте реакторы на быстрых нейтронах».

— **А почему не строят?**

Эрнеста Мониса\* (тогда он был первым заместителем министра, а сейчас возглавляет Министерство энергетики США) поступил месседж: прекратите работы в Бушере. Полная бессмыслица: никто не строил сначала атомные станции, чтобы создать ядерное оружие. Я об этом разговаривал и с Элом Гором, и с Биллом Клинтонем во время его последнего визита в Москву — не помогло. Бушер, как вы знаете, достроен, и первый блок АЭС с августа 2012 г. работает на стопроцентной мощности, а хорошую сферу возможного сотрудничества потеряли: здесь совместно могли бы быть решены и обострившиеся в настоящее время в США проблемы ОЯТ, не потребовались бы санкции, которые через столько лет наконец договорились снять с Ирана.

— **Переход от тепловых реакторов к реакторам на быстрых нейтронах — это эволюция или революция?**

— Скорее тяжелый технический процесс, который, к сожалению, пока тормозится. По разным причинам.

Я в июне был на Белоярской станции. Там сейчас работает БН-600 и готовится к энергетическому пуску БН-800. Развитие быстрых реакторов вообще идет эволюционно, начиная с БР-5 и БР-10 в Физико-энергетическом институте. Потом были реакторы в Шевченко, в Актау, БН-350, потом БН-600 и, наконец, БН-800. Еще исследовательский реактор БОР-60 в Димитровграде (НИИАР). Но все

они, хотя и решали практические задачи (выработка тепловой и электрической энергии на БН и реакторные испытания на БОР), но были дотационными. Я считаю, что теперь наступила очередь коммерческого применения. Однако до сегодня АЭС с этими реакторами не стали экономически конкурентоспособными.

— Но ведь быстрыми реакторами занимаются не только в России. Как дела у Китая, Франции?

— Китай уже построил быстрый реактор мощностью 60 МВт, практически всю технологию взял у нас. При этом они не постеснялись запатентовать то, что мы запатентовать поленились. Активно в этой области работали до Фукусимы японцы. На стадии пуска АЭС с БР мощностью 500 МВт в Индии.

Французы не сумели решить технические проблемы. «Феникс»\*\* у них еще более-менее сносно работал, а у «Суперфеникса» мощностью 1,2 тыс. МВт коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) в среднем не превысил 10%. Это КПД хорошего паровоза. Сумма физических и технологических проблем, а также проблем управления оказалась достаточно сложной.

— Мы их решили?

— Уже два десятка лет безаварийно и с высоким КИУМ (более 86% в 2014 г.) работает БН-600 на Белоярской АЭС.



Исследовательский реактор на быстрых нейтронах БР-10

У меня достаточно высокая степень уверенности, что мы решим комплексно и задачу замыкания ядерного топливного цикла. В составе опытно-демонстрационного комплекса (ОДЭК), который уже начали строить на площадке Сибирского химического комбината, предусматриваются и производство топлива, и реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, который будет использовать это топливо, и комплекс по переработке ОЯТ на месте. Реализуется полный пристационарный замкнутый ядерный топливный цикл.

**«Росатом» — один из крупнейших экспортеров ядерного топлива для построенных нами АЭС. Если это направление будет развиваться, урана не хватит**

— И когда это все может заработать?

— Темпы у нас сегодня, конечно, не такие, как 70 лет назад, на заре первого атомного проекта. Тогда первый реактор сделали за три года, а ядерную бомбу — за четыре. Сегодня только на переход на новое топливо уходит до 30 лет. Но на этом фоне «Прорыв» выглядит неплохо. Прошло три года, а мы на Белоярской атомной станции испытываем уже девятую тепловыделяющую сборку. Это сотни твэлов. Первую, с выгоранием более 6%, выгрузили, осенью она пойдет на послереакторные исследования. Вполне можно сказать, что мы продвигаемся энергичнее и быстрее, чем многие аналогичные проекты. Да и результативность на вложенный рубль высокая.

— Есть ли фундаментальные проблемы, которые стоят на пути проекта или создают дополнительные риски?

— В академическом плане фундаментальных проблем нет. В практическом — нам противостоят бюрократия, неразвитость целого ряда структур, которые имеют право принимать решения, ничего не понимая в сути вопроса. От этого страдают не только атомное дело, но и многие другие наши отрасли.

Хорошая затея с конкурсами, без которых нельзя заключать контракты: должна и коррупцию свести под корень, и сказаться на снижении цен при закупках. Но когда хорошо известно, что качественно работу могут выполнить два-три, а иногда и вообще

только одно предприятие, — зачем конкурс? В период моей дружбы с *Westinghouse Electric Company*, когда они показывали системы управления для модернизируемых АЭС в Питтсбурге, я спросил о конкурсе — так они удивились. У нас, говорят, постоянный поставщик в течение 20 лет, зачем же конкурс?

— **Какие индивидуальные принципы заложены в «Прорыв»?**

замыкаться через 10, 15, 20 лет, то увеличится потребность в делящихся материалах, омертвляемых при хранении, и увеличатся объемы хранилищ топлива. Этократно повышает затраты. Мы поставили для себя задачу довести внешний топливный цикл до одного года. Для этого пьюрекс-процесс не годится, водные растворы не используешь. Науке давно известны другие, в частности пирохимические технологии, где имеют дело



Возможно, к концу столетия примерно 50% электроэнергии в России будет производиться на АЭС

— Люди. Если не считать строителей, суммарно в проекте работает около 1,5 тыс. человек. Как и в любом деле, определяющее значение имеют десятки. Они отбираются в соответствии с очень высокими критериям квалификации и пониманием важности вызова, с которым мы работаем. Если человек осознает, что это вызов времени, природе, человечеству, если у него горят глаза — наш человек. Нет — иди, работай где-то еще. Именно поэтому, по решению С.В. Кириенко, для основных специалистов проекта установлена высокая мотивационная планка. У нас ни банковским служащим, ни работникам «Газпрома» не завидуют.

— **Какие технологические проблемы следует решить для того, чтобы точно убедиться в правильности выбранного направления?**

— Существует дорожная карта, в соответствии с которой и решаются все проблемы. Составлена она была еще в 2012 г. — и только что актуализирована. Часть задач мы решаем быстрее, чем предполагалось, часть, к сожалению, медленнее.

Вот наиболее характерный момент. Есть такой пьюрекс-процесс (*регенерация урана и плутония посредством экстракции, технологический процесс переработки облученного ядерного топлива. — Примеч. ред.*), предусматривающий работу с водными растворами. Вода под действием облучения разлагается, это радиолиз. Поэтому ОЯТ, прежде чем перерабатывать, чтобы замкнуть цикл, нужно долго выдерживать. Если цикл будет

с солями, с электрохимией. Таким образом, общие академические задачи здесь тоже решены, но осталось достаточно много нюансов в технологиях, технологических проблем. Впрочем, все они решаемы.

Для опытного комплекса мы поставили технологии «в затылок»: пирохимией рассчитываем снять основную активность, а дочистить продукты поможет гидрометаллургия (тот самый пьюрекс).

— **Что нам даст замыкание топливного цикла с экономической точки зрения? Сократится потребность в горнорудной урановой отрасли, в объемах хранения?**

Для развития ядерной энергетики необходимо решить ряд важных проблем. Самая большая из них — аварии, приводящие к эвакуации населения

— Хотите попутать геологоразведчиков? Давайте. По моим данным, у нас в стране сейчас достоверно разведанных запасов урана — примерно 600 тыс. т. Атомная энергетика в нашей стране по электропроизводству сегодня занимает почти 18%, хотя доля ее установленной мощности среди других генераций — 11%. Если ее вклад увеличить раз в пять, то до конца столетия запасов хватит, а дальше ни разведка не нужна будет, ни покупать ничего не надо будет — мы будем заниматься топливным самовоспроизводством. Баланс замыкается. Геологи отдыхают.

Но «Росатом» — один из крупнейших экспортеров, в том числе и ядерного топлива, для построенных нами АЭС. Если это направление будет активно развиваться, собственных запасов урана может и не хватить. Нужно будет либо использовать зарубежные активы госкорпорации по урановому сырью, либо прописывать условия: мы приходим в такую-то страну строить атомную станцию, а они покупают уран на мировом рынке. Здесь могут быть разные подходы.

**— Напоследок хочется пофантазировать. Когда-то мы почти полностью перешли с дровяного отопления на угольное. Потом с угольного — на нефть и газ. Сейчас на очереди атомная и, может быть, еще термоядерная энергетика. Когда мы дойдем до того, что у нас ядерной энергии будет не 18%, а хотя бы 70–80%?**

— Прежде всего, это определяется тем, когда пять проблем, о которых я сказал, будут технологически решены. Оружие нужно любой ценой, ядерная энергетика — не любой. Сейчас она приблизилась к границе своей конкурентоспособности и не всем внушает уверенность в плане безопасности. Для развития крупномасштабной ядерной энергетике необходимо решить ряд животрепещущих проблем. Самая большая из них — аварии, приводящие к эвакуации населения, провоцирующие банальные человеческие страхи. Не менее значимая — утилизация отходов. Справившись с ними, мы сможем на практике реализовать то, о чем мечтал еще Менделеев: перестать «топить ассигнациями», бездарно сжигать бесценное химическое сырье — нефть и газ.

Дальнейшее определяется практическими потребностями. Я считаю, что уже с начала 2030 гг. мы вполне можем последовательно, в дополнение к работающим блокам, начать переводить ядерную энергетiku на замыкание топливного цикла на быстрых реакторах. Существующие и вновь вводимые до 2030 г. блоки с ВВЭР будут работать практически до конца столетия. Наши аналитики посчитали, что к концу столетия в России можно выйти примерно на 50% производства электроэнергии на АЭС. Высвобождаются для внеэнергетического использования или экспортных потребностей огромные количества газа и нефти.

## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### ЕВГЕНИЙ ОЛЕГОВИЧ АДАМОВ

**Доктор технических наук, профессор, академик Российской инженерной академии, научный руководитель НИКИЭТ.**

- Родился в Москве.
- В 1962 г. окончил МАИ им. С. Орджоникидзе.
- С 1962 по 1986 г. — инженер, старший инженер-оператор, главный инженер отдела, заместитель директора отделения, главный инженер отделения, главный инженер института, заместитель директора Института атомной энергии им. И.В. Курчатова.
- 1986–1998 гг. — директор НИКИЭТ, с 1988 г. — генеральный конструктор.
- С 1989 г. — член правления Ядерного общества СССР, а затем России. В 1993–1998 гг. — член Международного экспертного совета по проекту *ITER*.
- 1998–2001 гг. — министр РФ по атомной энергии.
- С 1998 г. — научный руководитель НИКИЭТ.
- С 2002 г. — член консультативного совета Всемирной ядерной ассоциации (*WNA*).
- Заслуженный деятель науки и техники РФ (1995).
- Автор более 300 научных публикаций.
- Награжден орденом «Знак Почета», медалями «За доблестный труд» и «В память 850-летия Москвы».

Сейчас мы соревнуемся с Китаем. Он собирается к 2020 г. задействовать примерно 30 ГВт и заложить еще 36. Это колоссальный темп. У нас сегодня в работе примерно 25 ГВт. Стратегия энергетического развития предусматривает повышение мощности к 2030 г. до ~35 ГВт, а к 2050 г. — и до 50 ГВт, и тут уже существенную долю могут обеспечить АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.

Что касается термояда, тут все будут определять опять же экономические факторы. Термоядерный синтез по отношению к ядерной энергетике деления — это все равно что скальпель против топора. Мы топором занимаемся, а термояд — это скальпель. Это очень тонкая технология.

**— Но топор ведь тоже нужен.**

— Конечно, скальпелем дров не нарубишь. ■

*Беседовал Валерий Чумаков*

\* Эрнест Монис — американский физик-ядерщик, министр энергетики США, в описываемые времена — заместитель министра.

\*\* «Феникс» — энергетический реактор-размножитель на быстрых нейтронах в ядерном центре Маркуль. Запущен в 1973 г., заглох в 2010 г.. «Суперфеникс» был построен там же, проработал с 1985 по 1998 г.



# Приручаем Термояд



**З**амкнутый топливный цикл сможет обеспечить человечество энергией на многие столетия вперед. Тем не менее ученые уже работают над следующим поколением энергетических платформ. О том, как в будущем переплетутся ядерная и термоядерная энергетика, нам рассказал президент НИЦ «Курчатовский институт» академик РАН **Евгений Павлович Велихов**.

**— Евгений Павлович, каковы перспективы фундаментальных исследований по управляемому термоядерному синтезу сегодня?**

— Видите ли, этот вопрос уже не представляет собой предмет только фундаментальных исследований. И у нас, и в Европейском союзе он уже стоит в программе развития энергетики. Хотя, конечно, проблем на пути создания такой комбинированной термоядерной энергетике еще очень много. Среди них есть вопросы и академического плана, чисто научные, упирающиеся в понимание природы многих явлений, напрямую даже не связанных с энергетикой. Ведь плазма, с которой работают в установках термоядерного синтеза, — это основное состояние вещества во Вселенной. Солнце, все звезды, межзвездное пространство — все это плазма.

**— Когда появились первые идеи использовать реакции управляемого термоядерного синтеза в энергетике?**

— Все начиналось еще до войны, с работ члена-корреспондента АН СССР Георгия Антоновича Гамова, где термоядерные реакции синтеза изучались как раз как основной источник энергии в звездах.

Тогда, конечно, сразу появились идеи использовать эти же процессы и на Земле. А уже после войны, в 1952 г., на стол Сталину легла статья — служебная записка, написанная Игорем Васильевичем Курчатовым и Игорем Николаевичем Головиным. Там говорилось, что вся энергия, которую мы получаем от Солнца, собирается на Земле в основном в трех элементах: уране-238, тории и дейтерии (а на уголь, газ, нефть и прочее топливо приходится всего 2% запасенной энергии). Правда, напрямую использовать эти элементы нельзя, поскольку они, грубо говоря, не горят. Их нужно обязательно переработать. Первыми двумя (ураном-238 и торием) занимается классическая ядерная энергетика, а дейтерием и другими изотопами водорода — термоядерная энергетика. Хотя, конечно, когда все это начиналось, разговоры шли больше не об энергии, а о синтезе плутония для атомной бомбы. Но 28 августа 1949 г. были проведены успешные испытания атомной бомбы и ученые вернулись к разработке идей, связанных с ядерной энергетикой. Тогда как раз Курчатовский институт (в то время — Лаборатория измерительных приборов АН СССР (ЛИПАН)) взялся за разработку энергетики на термоядерном



Вид строительной площадки ITER в Кадараше (апрель 2015 г.)

синтезе, а Игорь Евгеньевич Тамм и Андрей Дмитриевич Сахаров предложили свою схему токамака — установки для термоядерного синтеза.

— **Курчатов, Тамм, Сахаров — великие ученые...**

— Да, выдающиеся ученые. Но надо сказать, что первое предложение установки было достаточно своеобразным: оно было описано в письме Сталину от одного очень толкового моряка с Сахалина. Но, правда, у него там были серьезные ошибки. Особенно в вопросе удержания плазмы в установке.

— **Расскажите, пожалуйста, подробнее об этом аспекте и общем устройстве токамака.**

— Дело вот в чем: когда вы работаете, например, с плутонием или ураном, то вам не нужны очень высокие температуры. Они делятся, и от этого выделяется энергия. А когда вы работаете с дейтерием, нужны температуры порядка 100 млн градусов Цельсия: только в таких условиях в норме отталкивающиеся друг от друга атомы смогут приблизиться настолько, чтобы произошла реакция синтеза, в результате которой выделяется энергия. Поэтому в токамаках используется высокотемпературная плазма, которую еще надо удерживать подалеже от стенок, потому что любое соприкосновение — и плазма загрязнится самыми разными атомами, охладится и в конце концов исчезнет. Тамм и Сахаров предложили решать этот вопрос с помощью магнитного удержания: в токамаке создается сильное магнитное поле, которое удерживает плазму на весу, она как бы висит посреди реактора и вдали от стенок. С тех пор предлагались и другие варианты ловушек, но токамак остается доминирующим решением, принятым мировым научным сообществом.

— **И как раз большой токамак сейчас строится в рамках ITER?**

— Да. С тех пор было построено много установок, сейчас в мире их, наверное, около сотни. Мы

в Советском Союзе впервые в 1975 г. получили мощную для энергетики термоядерную реакцию, у нас же было продемонстрировано, что в токамаке можно получить десятки миллионов градусов. И постепенно Курчатовский институт убедил мировую научную общественность и руководство страны, что мы идем по правильному пути и управляемый термоядерный синтез реализуем и чрезвычайно необходим. В результате в 1985 г. на встрече Горбачева и Рейгана было принято решение о создании мировой кооперации. Сейчас в ней семь партнеров — Россия, Евросоюз, США, Китай, Южная Корея, Япония и Индия. И все вместе мы строим установку, которую можно будет рассматривать как технологическую платформу. Это очень важный шаг. То есть это еще не прототип реактора для термоядерного синтеза, но платформа, на которой отрабатываются все основные физические и технологические проблемы. Установка носит название «Международный термоядерный экспериментальный реактор» — *ITER*. Во французском Провансе, в Кадараше, уже идет строительство. Все договоры на поставку оборудования уже заключены, и к 2020 г., максимум к 2025 г. *ITER* должен быть готов.

— **А как выглядит сама установка?**

— Она занимает большой зал, примерно 100 x 100 x 100 м, — там установлен токамак. Это очень технически сложное сооружение: в самой его сердцевине температура в 150 млн градусов Цельсия, а вокруг сверхпроводящие катушки, создающие удерживающее магнитное поле, — они работают уже при температуре всего 4° K (-269,15° C). Дальше в составе токамака еще область, поглощающая нейтроны (они образуются при термоядерном синтезе), — там идут охлаждение и теплообмен.

— **Каков вклад наших ученых и специалистов в эту разработку?**

— Сейчас там на площадке идет строительство, а про огромный фундаментальный вклад наших ученых я уже говорил: Сахаров, Тамм, Михаил Александрович Леонтович, Лев Андреевич Арцимович. Наши ученые и сейчас в проекте на первых ролях. Например, Олег Геннадиевич Филатов, директор НИИ им. Д.В. Ефремова и сотрудник «Росатома», сейчас возглавляет научно-консультативный комитет проекта. Мы участвуем во всех работах. Так, в России разработан специальный сверхпроводник — ниобий-три-олово, — который сохраняет свои свойства даже в очень сильных магнитных полях.

**— Что будет дальше? Как будет развиваться термоядерная энергетика в случае успеха ITER?**

— *ITER*, как я уже говорил, — это технологическая платформа. На нем отрабатываются принципиальные решения и некоторые научные задачи (другие задачи могут решаться на других установках или, например, путем математического моделирования на суперкомпьютерах). Важно понимать, что у нас есть межправительственное соглашение, по которому каждый участник кроме Европы вносит в проект одинаковый вклад. Поскольку установка строится на территории Европы, то их вклад больше — например, все строительные работы идут за их счет. Так вот, каждая сторона делает одинаковый вклад и получает одинаковую отдачу — права на всю наработанную интеллектуальную собственность проекта. То есть, грубо говоря, вкладываем 10%, а получаем 100%. Как потом использовать эти результаты, зависит уже от каждой из сторон.

**— Каждый участник ITER потом может идти своим путем?**

— Да. Получим мы 500 МВт термоядерной мощности и другие заявленные технические параметры — и дальше можем на базе наработанной физики и технологий развивать свои проекты. Тем более что наше видение отрасли значительно отличается от мирового. На Западе и в Японии есть некая традиция максимального использования конкуренции. То есть представители обычной ядерной энергетики и термоядерного синтеза постоянно находятся в состоянии вражды. Термоядерщики говорят, что атомная энергетика грязная и опасная, а ядерщики говорят, что термоядерного синтеза нет и неизвестно, будет ли он когда-то. У нас оба этих направления начинались в одном Курчатовском институте, и у нас сразу закладывалось, что тот же термоядерный синтез будет использоваться для производства военного плутония. Потом от этих идей отказались, но суть остается неизменной: мы с самого начала разрабатываем гибридную систему, в которой нейтроны, получающиеся при термоядерном синтезе, потом помогают нарабатывать ядерное топливо. Они в десять раз дешевле по энергетике, чем частицы, полученные в процессе деления. Это огромная выгода.

## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### ЕВГЕНИЙ ПАВЛОВИЧ ВЕЛИХОВ

Академик РАН, член Европейской академии наук, президент НИЦ «Курчатовский институт».

- С 1988 г. — председатель правления проекта *ITER*, 2010–2012 гг. — председатель Совета *ITER*.
- С 2001 г. — член президиума Совета при Президенте РФ по науке и образованию.
- Обладатель многочисленных отечественных и зарубежных наград, почетный профессор университетов Европы и Америки.

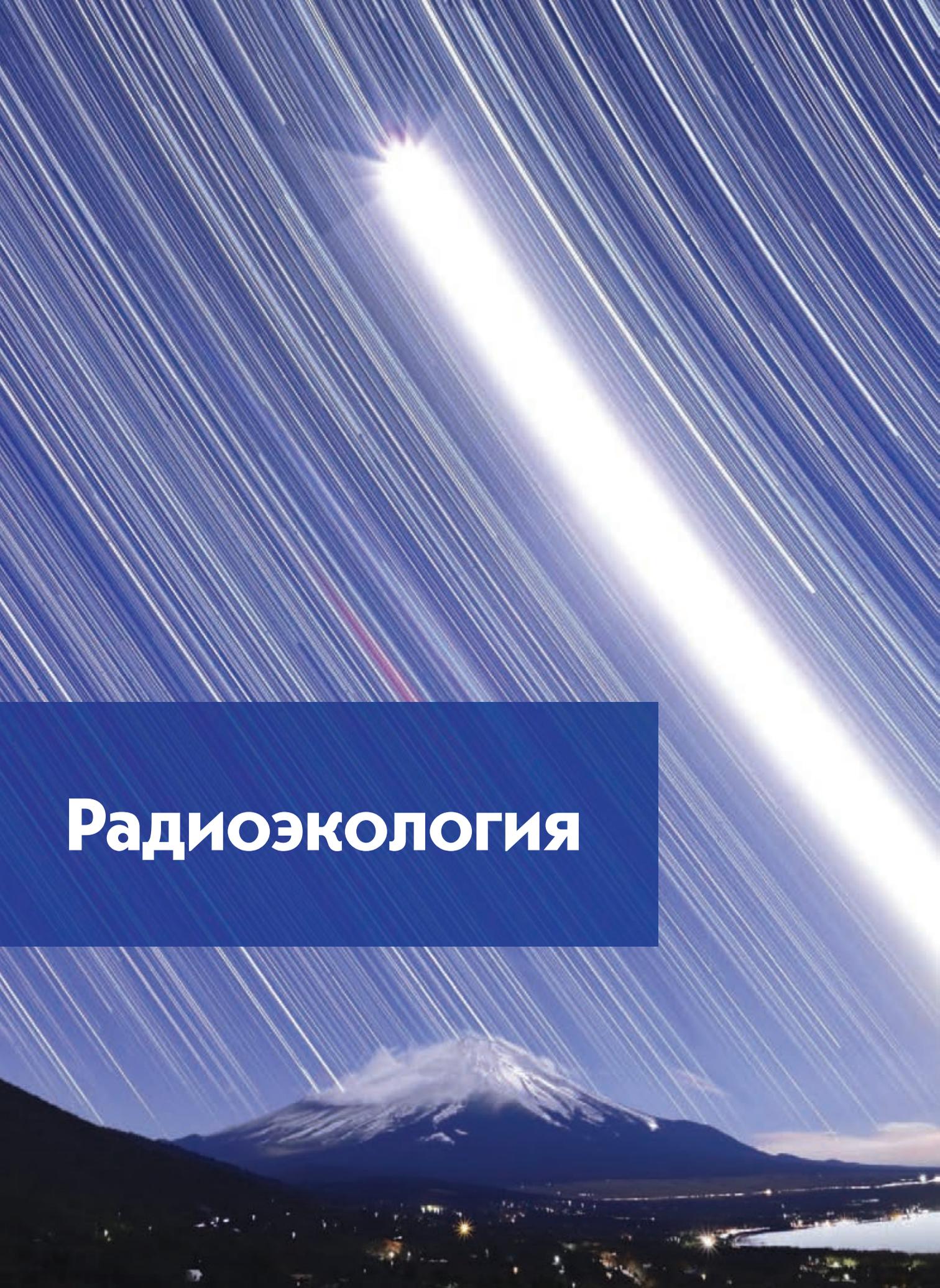
**— Хорошо. Термоядерная и ядерная энергетика могут работать в сцепке. Но как же остальные? Возобновляемые источники энергии? Все равно эти технологии будут соперниками?**

— Я уверен, что для масштабного развития экономики на Земле возможен только один путь — это ядерная энергетика. А в ядерной энергетике оптимальным видится именно гибридный вариант. Тут надо учитывать еще некоторые тонкости. Дело в том, что атомная энергетика уже установилась как область: время жизни атомных реакторов сейчас приближается к сотне лет. Мы уже сейчас проектируем и строим такие реакторы, и мы должны рассчитывать так, чтобы обеспечить их топливом на все эти 100 лет. Здесь гибридный подход очень полезен. Кроме того, он более безопасный: вероятность крупных аварий вроде Чернобыля или Фукусимы сильно снижается. Я не буду вдаваться здесь в детали, но ключевым фактом здесь выступает использование специальной системы охлаждения.

**— Когда можно ждать появления гибридных термоядерных установок?**

— Тут заранее сказать сложно. Например, *ITER* переносит свои сроки. Сейчас совет по *ITER* возглавил новый директор — Бернар Биго, который до этого был главой Комиссариата по атомной энергии Франции, и в ноябре мы будем собираться в Кадараше. Тогда он нам даст полный и реалистичный план-график до получения заявленной термоядерной мощности на *ITER*. В свое время мы рассчитывали уложиться до 2016 или 2017 г., сегодня сроки сдвигаются до 2025 г. Но к тому времени, как заработает *ITER* — технологическая база для решения и отработки всех конструктивных вопросов, — у нас должен появиться еще и первый рабочий прототип. А потом — прямой путь к станции. Поэтому мы рассчитываем, что первый вариант гибридного ядерного реактора появится уже в первой половине этого века. ■

Подготовил Михаил Петров



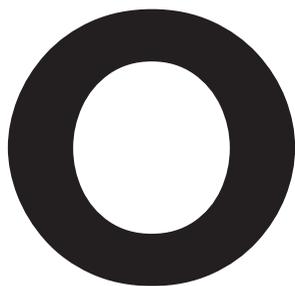
# Радиоэкология



**«Сегодня задача радиозкологов — продвинуться в решении проблемы радиоактивных отходов и выработать единые международные нормативы радиационной безопасности для человека и окружающей среды».**

Директор ВНИИРАЭ доктор биологических наук, профессор, академик РАН

**Рудольф Михайлович  
АЛЕКСАХИН**



б истории возникновения радиационной экологии и о том, какие задачи стоят перед радиозкологами сегодня, рассказывает доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, эксперт НКДАР ООН **Рудольф Михайлович Алексахин**.

— **Рудольф Михайлович, в книге ученого-атомщика из Великобритании Джона Сэнделлса «36 лет рядом с атомом» (*Thirty-Six Years at the Atomic*) вы и английский сельскохозяйственный радиозколог Скотт Расселл названы крестными отцами радиозкологии. Дайте как крестный отец определение науки, которой вы занимаетесь вот уже почти 60 лет.**

— Радиационная экология — это область естествознания, изучающая влияние ионизирующей радиации на живые организмы (в том числе человека), их сообщества, популяции, т.е. на биоту (окружающую среду) в целом.

Замечу, что радиозкология изучает как воздействие естественных радионуклидов, так и особенности существования живых организмов в условиях радиоактивного загрязнения, т.е. при выведении в окружающую среду техногенных (искусственных) радионуклидов.

В прикладном плане радиозкология призвана обеспечить радиационную безопасность использования ядерной энергии во всех отраслях нашей хозяйственной деятельности.

— **Когда возникла радиозкология, кто ее основоположники и какие этапы в ее развитии вы можете выделить?**

— Зарождение радиозкологии как науки произошло за полвека до появления самого термина «радиозкология». В 1896 г. Анри Беккерель открыл естественную радиоактивность солей урана, через два года Пьер Кюри и Мария Склодовская-Кюри обнаружили радиоактивность тория, а Эрнест Резерфорд, проведя детальное экспериментальное изучение «радиоактивных лучей», показал, что радиация состоит из трех типов излучения, названных соответственно  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучами, и к 1911 г. раскрыл ядерную природу радиации.

Уже тогда появилось понимание того, что радиационный фон — это важный компонент окружающей среды, и началось изучение воздействия ионизирующей радиации на живые организмы. Таким образом, радиоэкология появилась одновременно с такими науками, как радиохимия, радиобиология, радиационная геология, и сразу же вошла в систему наук, связанных с ядерной отраслью, с ядерной и атомной физикой.

Важную роль в становлении радиоэкологии сыграл наш великий соотечественник академик Владимир Иванович Вернадский. Еще в 1920-х гг. прошлого века он провидчески сказал: «Человечество обретает могучую силу, силу атома. Будет ли атом использован в мирных или военных целях, покажет будущее».

На первом этапе радиоэкологии изучали распределение в биосфере тяжелых естественных радионуклидов, их миграцию и процессы концентрирования в растениях и животных, пытались понять значение естественной радиоактивности в жизненных процессах и общей эволюции живого. Например, тот же Вернадский описал закономерности накопления радия пресноводными растениями, а отец советской атомной бомбы академик Игорь Васильевич Курчатов изучал радиоактивность снега и дождя.

Второй этап истории радиоэкологии начался в середине 1950 гг. XX в. Атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки в 1945 г., а затем глобальные радиоактивные выпадения (*fallout*) после интенсивных испытаний атомного оружия привели к значительному росту радиационного фона на всей планете.

Именно тогда появился термин «радиоэкология». Его независимо друг от друга предложили советские и американские ученые. Со стороны СССР это были организатор и первый директор Института биофизики АН СССР, один из основателей Пагуошского движения, член-корреспондент АН СССР Александр Михайлович Кузин, доктор биологических наук Анатолий Александрович Передельский, а также мой учитель — академик ВАСХНИЛ, участник атомного проекта нашей страны Всеволод Маврикиевич Клечковский. С американской стороны это был автор классического труда «Экология» Юджин Одум. Эти ученые показали, что искусственная радиоактивность, вносимая человеком в природу, представляет собой новый мощный экологический фактор.

Тогда, в 1950-1960-е гг., был особый этап радиоэкологии. Когда начались радиоактивные выпадения после ядерных испытаний, на исследование процесса их рассеяния по всему земному шару были мобилизованы ученые со всего мира. В те годы были проведены обширные исследования миграции основных радиологически значимых искусственных радионуклидов в различных природных средах и дана количественная оценка их



Р.М. Алексахин в теплицах ВНИИРАЭ

воздействия на биогеоценотическом уровне. Клечковский, в частности, изучил поведение радиоактивных продуктов деления тяжелых ядер (изотопов стронция, иттрия, цезия, циркония) в почвах и их поступление в растения.

Затем наступил этап 1960-х гг., когда основное внимание в радиоэкологии сосредоточилось на безопасности использования ядерной энергии. Необходимо было разработать способы ограничения возможного вредного воздействия радиации, связанного с использованием источников ионизирующего излучения в промышленности, медицине и науке, выбросами АЭС и радиоактивными отходами.

Наконец, в 1986 г. с аварии на Чернобыльской АЭС начался современный этап радиоэкологии, новый импульс развитию этой области придала авария на японской АЭС «Фукусима-1»

**— Какие главные научные задачи стоят сегодня перед радиоэкологией?**

— Основная задача радиоэкологии и соответствующих радиационных технологий — добиться максимального снижения количества радиоактивных веществ, которые поступают в окружающую среду и включаются в биологические цепочки миграции, ведущие к человеку, уменьшения их химической подвижности и биологической доступности. Важно научиться управлять радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом.

— **Может ли атомная энергетика быть абсолютно безотходной?**

— Диалектика развития человеческого общества и эволюция промышленности однозначно свидетельствуют о том, что эти процессы невозможны без образования отходов. Вопрос в том, сколько образуется этих отходов и как по возможности технически превратить их в полезные ингредиенты. Так и ядерное энергопроизводство, где образование РАО неизбежно. Необходимо лишь принимать меры по их уменьшению, превращению в биологически инертные формы, регулировать их радионуклидный состав, стремясь к снижению количества наиболее радиологически опасных, уметь надежно захоранивать, т.е. экологически грамотно управлять РАО. В этом отношении у радиоэкологов есть и предложения, и конкретные достижения.

— **Радиация не признает государственных границ. Решение проблем радиоэкологии невозможно усилиями только одной страны. Какова сейчас структура международных организаций, которые разрабатывают правовую базу и стандарты радиационной безопасности во всем мире и в России?**

— К счастью, с того момента, когда мир осознал опасность ядерной войны и гонки ядерных вооружений, чтобы гарантировать безопасность развития мирного атома и сдержать распространение ядерной угрозы, были созданы такие организации, как МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии, *The International Atomic Energy Agency (IAEA)*), МКРЗ (Международная комиссия по радиологической защите, *The International Commission on Radiological Protection (ICRP)*), НКДАР ООН (Научный комитет ООН по действию атомной радиации, *The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)*). Наконец, у радиоэкологов есть своя профессиональная организация — МСР (Международный союз радиоэкологии, *International Union of Radioecology (IUR)*).

— **Каково распределение обязанностей между перечисленными вами организациями?**

— Цели и задачи всех вышеперечисленных международных организаций — обеспечение радиологической безопасности для человека при всех видах использования ядерной энергии в деятельности человека (в первую очередь это касается ядерной энергетике, всех предприятий полного ядерного топливного цикла).

**Сегодня задача радиоэкологов — продвинуться в решении проблемы радиоактивных отходов и выработать единые международные нормативы радиационной безопасности для человека и окружающей среды**

В семействе учреждений Организации Объединенных Наций МАГАТЭ обобщает мировой опыт радиационной защиты персонала атомных станций и населения, а также разрабатывает рекомендации по вопросам безопасности работы АЭС и других предприятий ядерного топливного цикла. Важная задача МАГАТЭ — способствовать мирному применению атомной энергии во всех ее формах и одновременно не допускать использования ядерных материалов и технологий в военных целях.



Торцевые самогасящиеся счетчики  $\beta$ -излучения (Т-БФЛ)

Мандатом ООН еще одному ведомству из ее семейства — НКДАР ООН — поручен анализ радиологической обстановки на земном шаре: оценка доз облучения различных групп населения и содержания радионуклидов в организме человека и объектах окружающей среды в разных регионах земного шара. Здесь собирают и анализируют последние научные достижения в изучении биологического действия ионизирующего излучения и защиты от него, оценивают состояние знаний по наиболее актуальным проблемам радиологии, радиэкологии, радиационной гигиены и медицины. Отчеты НКДАР ООН — мировые энциклопедические сводки по различным проблемам радиационной защиты — служат настольными книгами у специалистов атомной отрасли.

МКРЗ объединяет видных ученых различных стран в области радиационной безопасности, ее задачи — разработка принципов и системы радиационной защиты человека и окружающей среды.

Наконец, МСР объединяет профессиональных радиэкологов мира, перед этой организацией — самой молодой в системе международного альянса (она создана в 1978 г.) — стоит задача координации работ в области защиты окружающей среды от воздействия ионизирующего излучения

— **Какое место в этой структуре занимает «Росатом»?**

— Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», ее подразделения и институты принимают активное участие в работе указанных выше организаций. Делегации Российской Федерации — наи-

более многочисленные из всех 27 стран — членов НКДАР ООН на ее сессиях, в главную комиссию МКРЗ и пять ее комитетов входят ведущие ученые России, в составе исполкома МСР есть представители нашей страны, в многочисленных мероприятиях, проводимых под эгидой МАГАТЭ, участвуют специалисты нашей страны.

— **Какова роль госкорпорации «Росатом» в развитии радиэкологических исследований в нашей стране?**

— В руководящей структуре атомной отрасли нашей страны (за 70 лет ее существования в различные годы название менялось — от Министерства среднего машиностроения СССР до государственной корпорации по атомной энергии сегодня) вопросам радиационной защиты окружающей среды всегда придавалось большое значение. В 1963 г. в составе Научно-технического совета Министерства среднего машиностроения по инициативе министра среднего машиностроения СССР Ефима Павловича Славского была образована радиэкологическая секция (известная среди специалистов как



Рабочий стол академика ВАСХНИЛ В.М. Клечковского, который внес существенный вклад в радиэкологию (музей ВНИИРАЭ)



Проведение опытов в теплицах

секция № 8), которой руководил академик ВАСХ-НИЛ В.М. Ключковский. По существу, Минсредмаш СССР, а ныне ГК «Росатом», — основной организатор и куратор радиоэкологических исследований в стране.

— **Какие отношения у вашего института с «Росатомом»?**

— Наш институт активно взаимодействует с учреждениями «Росатома», имеет договорные обязательства, но не входит как часть в эту корпорацию, мы находимся в системе Российской академии наук. «Росатом» высоко ценит и активно использует наш автономный, академический статус, обращаясь к нам за экспертными оценками.

На практике это выглядит, например, так: наш институт выполняет договорные обязательства по проведению радиационного мониторинга, специалисты ездят на предприятия ядерно-энергетического комплекса (в первую очередь АЭС). Мы разработали методические рекомендации по радиационному мониторингу, утвержденные государственными надзорными органами, располагаем кадрами радиоэкологов, имеем соответствующий специальный транспорт, производственную базу по ведению радиологического и физико-химического анализа объектов окружающей среды. По итогам полевых и лабораторных исследований составляются отчеты в «Росатом», «Росгидромет», Российскую академию наук, в различные государственные ведомства, ответственные за сооружение и эксплуатацию объектов ядерно-топливного комплекса. Это касается и добычи уранового

сырья и хранения радиоактивных отходов, затрагивает сами станции, весь ядерный топливный цикл от добычи до обработки и хранения отходов.

— **В научном мире уже много лет ведется дискуссия о стандартах радиационной безопасности. Какова ваша оценка существующих норм безопасности и нужно ли их ужесточать?**

— В радиологических науках многие годы господствовал лозунг «лучше переоценить опасность, чем недооценить ее». Эта философия берет начало в 1950-1960-х гг., в период существования угрозы возникновения ядерной войны, когда и сформировалось представление, что ионизирующее излучение — самый опасный экологический фактор. Это неверная предпосылка сопровожда-

**Основная задача радиозэкологии — добиться максимального снижения количества радиоактивных веществ, которые поступают в окружающую среду**

ет человечество более полувека. Да, радиоэкологи подтверждают: ионизирующее излучение — безусловно опасный экологически отрицательный фактор, оно обладает сильным биологическим воздействием. Все зависит от дозы облучения (применительно к ионизирующему излучению — от поглощенной живым организмом дозы облучения). Очевиден факт, что в природе была, есть и всегда будет естественная радиоактивность. Это obligatный фактор, сопутствующий эволюции всего живого на нашей планете: и флоры, и фауны, и, конечно, человека. Существуют колебания природного радиационного фона, в некоторых местах они могут достигать до 20%; уже понятно, что это не опасно, что человек нормально адаптируется к таким колебаниям.

Нормативы ограничения воздействия ионизирующих излучений на человека (а в последнее время и на биоту) во многом продолжают ориентироваться на точку зрения, что радиация — самый сильный экологический фактор. Это приводит к тому, что радиационные нормативы оказались более жесткими, чем, скажем, нормативы на химические токсиканты. До тех пор пока будут живы представления, что радиация — самая опасная и самая коварная штука, будет иметь место радиофобия.

Задача радиоэкологов — собрать как можно больше экспериментальных данных, изучить и проан-

ализировать, а потом оценить реальную степень радиационного риска. И уже после этого, опираясь на научные данные, ужесточать или ослаблять радиационные нормативы.

Нужно объяснять людям природу естественного радиационного фона, насколько он необходим и неопасен. Тогда они будут понимать, как относиться к источникам ионизирующей радиации антропогенного происхождения.

**— Ранее господствовало мнение, что «если радиационными стандартами защищен человек, то защищена от облучения и биота». Насколько оно соответствует современным научным данным?**

— Современных радиоэкологов такое утверждение отчасти уже не устраивает. Необходимо уточнение формулировки, согласно которой «человек здоров, значит, будет здорова и окружающая среда (биота)». Современные доктрины обеспечения радиационной безопасности требуют прямых доказательств, что дозы облучения, получаемые живыми организмами в конкретной ситуации, не приводят к патологическим изменениям. Таким образом, антропоцентрическая парадигма радиационной защиты, существовавшая во второй половине XX в., когда во главе угла стояла охрана здоровья человека, эволюционно сменяется экоцентрической, требующей паритетной защиты и человека, и биоты

Вместе с тем нужно отметить, что выше написанное всецело не отрицает постулат «защищен человек, защищена окружающая среда» Именно этот тезис позволил успешно развивать ядерную энергетику более 60 лет.

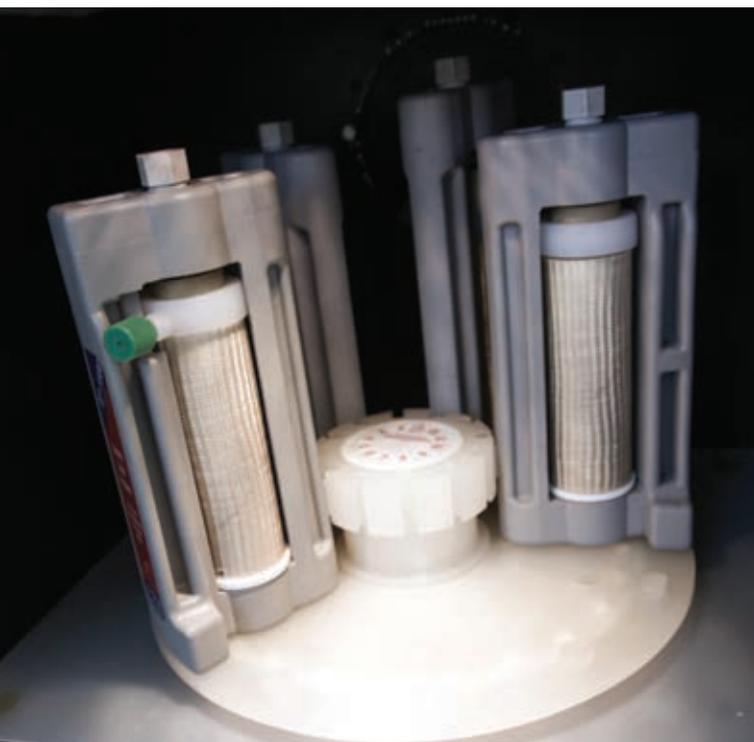
Одна из задач нынешнего дня — изучение действия радиации на человека и биоту для создания правовой базы одновременно и для того и для другого. Мы умеем определять нормы допустимого облучения для человека, начинаем разрабатывать аналогичные нормы для биоты, но пока эти вещи не гармонизированы.

**— Как быстро, по вашей оценке, произойдет гармонизация допустимых норм радиационного воздействия на человека и биоту?**

— Я думаю, этот вопрос будет решен в пределах ближайшего десятка лет. Человечество наконец поймет, что и биота и человек «живут



В теплицах Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ)



В лаборатории радиоэкологии и агроэкологического мониторинга



на одном дереве» и что мы должны нормировать пределы допустимого воздействия одновременно для одного и другого. Говоря афористично, человек будет здоров только в здоровой среде.

**— Как повлияли радиационные аварии на ядерных объектах на представления радиоэкологов о безопасности?**

— Первая серьезная радиационная авария произошла на ПО «Маяк» — это Кыштымская авария 1957 г. Был выброс большого количества искусственных средне- и долгоживущих радионуклидов в окружающую среду с образованием Восточно-Уральского радиоактивного следа. Тогда нам было еще очень мало известно.

Несколько позже в том же году была авария в Уиндскейле в Великобритании. Там загорелся реактор по наработке оружейного плутония на атомном комплексе в Селлафилде. Ситуация возникла весьма сходная с тем, что было в Кыштыме.

Затем был 1986 г. — Чернобыль. К этому времени мы уже накопили огромный объем знаний в области радиоэкологии. Совершенно точно могу сказать, что если бы у нас не было информации по Кыштыму, в Чернобыле нам было бы гораздо труднее осуществлять систему защитных мероприятий по реабилитации загрязненных угодий.

Если мы далее перекинем мостик в 2011 г., то японцев очень интересовал наш чернобыльский опыт, они его активно заимствовали — например,

перевели на японский нашу книгу о ликвидации последствий аварии — и применяли на практике в зоне аварии на АЭС «Фукусима-1».

Более того, был целый чернобыльский период, когда многие европейцы, японцы и американцы приезжали к нам учиться на опыте ЧАЭС, а мы, соответственно, в свое время транспонировали опыт Кыштыма на Чернобыльский регион.

Накопленный опыт позволяет нам глубже понять значимость аварий на ядерных объектах, их последствия. И мы говорим: надо сделать так, чтобы подобные аварии оказались совершенно недопустимыми.

**— Не секрет, что я аварии и антиатомная пропаганда породили у части населения радиофобию. Каковы в этих условиях перспективы ядерной энергетики?**

— Конечно, аварии в Чернобыле и на Фукусиме привели к некоторой стагнации в развитии ядерной энергетики. Но если Чернобыль породил настоящий чернобыльский синдром, то к Фукусиме в мире отнеслись намного более спокойно, т.к. уже знали, что нам грозит, и умели в определенной степени управлять последствиями.

Можно считать, что к настоящему времени общество сумело преодолеть последствия Чернобыля, когда у многих людей атомные электростанции и ядерная энергетика ассоциировались с негативным воздействием на человека и окружающую среду. Но оптимистичное восприятие перспектив ядерной энергетики и радиационных

технологий должно прочно базироваться на научном обосновании радиоэкологической безопасности.

— **Как вы оцениваете с позиций экологии проект «Росатома» «Прорыв»?**

— Еще Энрико Ферми, в 1942 г. запустивший первый ядерный реактор для военных целей, говорил: «Коллеги, работая на реакторах на тепловых нейтронах, мы далеко не уйдем!» К сожалению, современные реакторы на тепловых нейтронах — это обязательно большое количество радиоактивных отходов. Поэтому проект «Прорыв», одной из главных задач которого поставлено замыкание ядерного топливного цикла, будет действительно про-

## На конгрессе «Радиоэкология и радиоактивность окружающей среды», проводившемся в Барселоне, каждый седьмой доклад был из России

рывом. Ведь в реакторах на быстрых нейтронах можно будет использовать не только уран-235, которого всего-то 0,7%, но и уран-238, а его 99,3%. При замкнутом ядерном топливном цикле можно будет выжигать наиболее биологически опасные компоненты отходов и получать для хранения, как мы говорим, «более дружественные к биосфере» композиции радионуклидов. Поэтому мне как экологу проект «Прорыв» кажется очень перспективным.

— **Какое место российские ученые сегодня занимают в мировой радиоэкологии?**

— Было время, в 1950–1970-е гг., когда в мире были две лидирующие и конкурирующие школы радиоэкологии — советская и американская. Мы ревниво следили друг за другом. Американцы издавали переводы русских работ по радиоэкологии на английский язык, мы переводили и издавали американские труды.

Недавно в Барселоне прошел крупнейший конгресс под названием «Радиоэкология и радиоактивность окружающей среды». Каждый седьмой доклад был из России. А ведь в нем принимали участие больше 40 стран. Сегодня в Японии случился бум радиоэкологии, связанный с ликвидацией последствий аварии, — и то японцев было меньше,

чем россиян. Так что и в настоящее время Россия занимает видное место в радиоэкологии — прежде всего потому, что в нашей стране ядерная энергетика развивается, а ядерная генерация энергии будет успешной только тогда, когда мы будем понимать, что она экологически состоятельна и безопасна.

Сохранение за Россией роли одного из лидеров в современной радиоэкологии требует усиления внимания к изучению миграции радионуклидов в окружающей среде и действия ионизирующего излучения на экосистемном уровне, роста инвестиций в эти работы со стороны «Росатома», Российской академии наук, Росгидромета, Федерального медико-биологического агентства и других заинтересованных ведомств.

— **В чем главная заслуга радиоэкологов перед человечеством?**

— Это очень важный и ответственный вопрос. Таких заслуг, с моей точки зрения, у радиоэкологов две. Во-первых, в период, когда велись интенсивные ядерные испытания и мировой радиационный фон на их пике за счет выпадений вырос почти на 10%, мы сумели доказать, что нельзя допустить дальнейшего неконтролируемого возрастания радиационного фона за счет антропогенного компонента. Тогда радиоэкологи всего мира совместными усилиями поставили заслон опасному развитию событий. Кстати, договор о частичном запрещении ядерных испытаний в трех средах: в атмосфере, в космосе и под водой — был заключен в Москве в 1963 г. И получил название Московского. Как следствие, были сделаны важные шаги в направлении всеобъемлющего запрещения ядерных испытаний и нераспространения ядерного оружия.

Во-вторых, радиоэкологи сумели вместе с другими специалистами ядерной отрасли доказать экологическую состоятельность и радиационную безопасность важнейшего вида энергопроизводства — ядерной генерации. Шестидесятилетний опыт ядерной энергетики убедительно подтверждает это вывод. Несомненны заслуги радиоэкологии в понимании важной роли естественного радиационного фона не Замле.

— **Какова главная задача современной радиоэкологии в мировом масштабе?**

— В заключение повторю еще раз: главные задачи радиоэкологии на современном этапе заключаются в развитии понимания экологической радиационной безопасности ядерной энергетики как важнейшего типа генерации электричества, решении проблем управления радиоактивными отходами и совершенствовании использования экоцентрических принципов радиационной защиты человека и окружающей среды. ■

Беседовал Александр Тутков



## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### РУДОЛЬФ МИХАЙЛОВИЧ АЛЕКСАХИН

**Доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, академик РАН.**

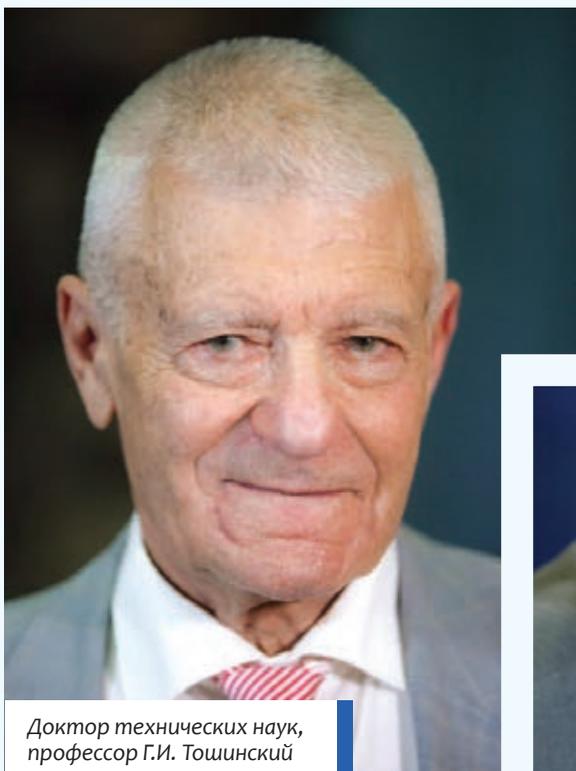
- Эксперт НКДАР ООН (Научного комитета ООН по действию атомной радиации), вице-президент и член исполкома Международного союза радиозологии, член Британского общества радиологов.
- Участник ликвидации последствий Кыштымской аварии на Южном Урале (1957) и аварии на Чернобыльской АЭС (1986) для сельскохозяйственного производства в пострадавших регионах.
- Академик Р.М. Алексахин выполнил комплекс радиозологических исследований по миграции радионуклидов в системе «почва — сельскохозяйственные растения — животные» на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа. Там же он был участником работ по лесной радиозологии, легших в основу этой науки.
- Соавтор первых рекомендаций по ведению сельского и лесного хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения окружающей среды.
- С 1989 г. — директор Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии (ВНИИСХРАЭ), был научным руководителем большого количества радиозологических работ в зоне чернобыльской аварии.
- За комплекс работ по ликвидации последствий Кыштымской аварии Р.М. Алексахину (в составе коллектива) была присуждена Государственная премия СССР (1974), а по итогам работ в зоне аварии на ЧАЭС как руководителю коллектива — Государственная премия Российской Федерации в области науки (2002).
- Р.М. Алексахин активно занимается разработкой радиозологических проблем ядерной энергетики, подчеркивая, что от успехов в области обеспечения радиационной безопасности зависит прогресс в ядерном энергопроизводстве.



# 200 ТЫСЯЧ КИЛОВАТТ ПОД ВОДОЙ

**Ядерного паритета СССР добился благодаря решению трех задач: созданию ядерного оружия, ракет наземного базирования и атомных подводных лодок как средства скрытной доставки ядерного оружия до территории потенциального противника**





Доктор технических наук,  
профессор Г.И. Тошинский



Доктор технических наук, профессор Е.П. Ключков

## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### ГЕОРГИЙ ИЛЬИЧ ТОШИНСКИЙ

**Доктор технических наук, профессор, советник генерального директора АО «ГНЦ РФ — ФЭИ». Заслуженный деятель науки и техники РФ.**

- Награжден орденами Трудового Красного Знамени, «Знак Почета», медалью «300 лет Российскому флоту», нагрудным знаком «Академик И.В. Курчатов» I степени.
- Победитель Обнинского конкурса «Человек года» в номинации «Наука» (2001 и 2007 гг.).
- Автор учебных пособий и научных статей. Соавтор охлаждаемого свинцово-висмутовым теплоносителем реактора для атомной подводной лодки, которая внесена в Книгу рекордов Гиннесса как самая высокоскоростная и маневренная среди лодок подобного класса.
- Последние 20 лет занимается вопросами гражданского применения таких реакторов.

### ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ КЛОЧКОВ

**Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник АО «ГНЦ НИИАР». Заслуженный деятель науки РФ, заслуженный изобретатель РФ.**

- Последовательно работал инженером, старшим инженером, руководителем технологической службы эксплуатации исследовательских реакторов СМ-2 и МИР.
- Занимая должность руководителя лаборатории петлевых испытаний твэлов, ТВС, пэлов (поглощающих элементов), топливных сборок, стержней регулирования и других изделий реакторной техники, основал научную школу «Петлевые ресурсные испытания».
- Автор десяти монографий и большого числа научных статей и докладов.
- Награжден тремя орденами и тремя медалями СССР и РФ. Отмечен пятью медалями ВДНХ СССР и ВВЦ РФ и другими наградами.
- За заслуги в радиационном обосновании материалов и изделий для активных зон реакторов атомных подводных лодок и атомных ледоколов творческая биография Е.П. Ключкова включена в биографические энциклопедии «Океанский ракетно-ядерный флот Советского Союза», «Ядерное оружие России», «Ученые России».



обеседовать о развитии подводной атомной энергетики мы решили с патриархами этого направления деятельности «Росатома», участвовавшими в создании нескольких поколений реакторов АПЛ различных типов, — **Георгием Ильичом Тошинским** и **Евгением Петровичем Ключковым**.

— **Кто первым создал атомную субмарину?**

**Г.Т.:** Когда в 1952 г. вышло постановление о создании советских атомных подводных лодок, подписанное лично И.В. Сталиным, Соединенные Штаты Америки уже закончили строительство своей субмарины «Наутилус». Постановление было ответом Советского Союза. Мы уже имели ядерное оружие, а вот средств его скрытной доставки у нас еще не было. Их надо было создавать.

— **Кто занялся проектом?**

**Е.К.:** Научным руководителем всей программы создания атомного флота России стал академик Анатолий Петрович Александров, один из отцов советской ядерной энергетики. Общеизвестной точкой отсчета начала работ считается 1952 г., но работы по определению возможности размещения ядерной установки на подводной лодке велись уже в 1950 г.

— **То есть в 1952 г. проект был уже практически готов? По крайней мере, в чертеже?**

**Е.К.:** Нет, что вы. Проекту предшествовали несколько лет напряженной работы. Сначала специалисты думали, какой реактор делать. Рассматривали несколько вариантов: с бериллиевым замедлителем и гелиевым охлаждением (индекс ВТ, научный руководитель — А.И. Лейпунский), модифицированный вариант проекта под индексом ВТ, в котором вместо гелиевого теплоносителя предполагалось использовать жидкометаллический; с графитовым замедлителем и гелиевым охлаждением (индекс ШГ, научный руководитель — А.П. Александров); с графитовым замедлителем и водяным охлаждением (индекс АМ, научный руководитель — И.В. Курчатова). Предложения с индексами ШГ и АМ в конце концов были отвергнуты в силу разных технических и научных причин. В конце 1952 г. к указанным выше вариантам реакторов для АПЛ был добавлен четвертый — энергетический реактор корпусного типа с водой под давлением, индекс ЭРКТ (впоследствии — ВМ), научным руководителем которого был А.П. Александров. Именно эти реакторы стали основой ядерных энергетических установок (ЯЭУ) морского назначения во всем мире. Пошел в малой серии и модернизированный проект с индексом ВТ, у которого было преимущество по температуре и выход на гребной винт был более мощным.

— **Как они разрабатывались?**

**Г.Т.:** Начну с предыстории. Я окончил Московский энергетический институт (МЭИ), физико-энергетический факультет, как и Евгений Петрович. В 1951 г. нам определяли темы дипломных проектов. Перед нашей группой была поставлена задача: исследовать возможность применения атомной энергии на флоте. Нас бросили как котят в воду — никто ведь ничего не знал. Мне досталась

**Академик Курчатова, когда собирал команду для разработки атомной бомбы, сказал: «Надо пригласить Александрова. Он знает много ненужных вещей, но здесь как раз они могут пригодиться»**

подводная лодка. Что это такое, я прочитал в Большой советской энциклопедии. Моим дипломным проектом стал корпусный реактор с водой под давлением. Академик Николай Сидорович Хлопкин раскопал, что это был первый проект корпусного реактора с водой под давлением, который сыграл свою роль в выборе основного направления еще до того, как в 1952 г. вышло постановление.

— **Получается, АПЛ выросли из вашего дипломного проекта?**

**Г.Т.:** Это очень смело сказано. Но толика моего труда там есть. Курьез еще тогда получился. Я сделал чертеж отсека в разрезе, там были лестницы для перехода с палубы на палубу с поручнями. Председатель комиссии Александров показывает мне на этот поручень, спрашивает: «Что это такое?» Я говорю: «Анатолий Петрович, это лестница.

У моряков она трапом называется». Он улыбнулся и сказал: «Я знаю». Ведь мне не было известно, что он раньше занимался разминированием кораблей, так что с флотом очень давно дружил. И дальше спрашивает: «А что же у вас поручни на уровне щиколотки?» Он сразу увидел несуразность. Он всегда вникал в мелочи. Академик Игорь Васильевич Курчатов, когда собирал команду для разработки атомной бомбы, сказал: «Надо пригласить Александра Ильяча Лейпунского. В 1952 г. у нас начались проекты и по воде, и по жидкому металлу. С тех пор я всю жизнь занимался реакторами с теплоносителем свинец-висмут

Когда я пришел в Физико-энергетический институт (ФЭИ, а тогда это была лаборатория «В»), мы занимались свинцово-висмутовым реактором под руководством Александра Ильяча Лейпунского. В 1952 г. у нас начались проекты и по воде, и по жидкому металлу. С тех пор я всю жизнь занимался реакторами с теплоносителем свинец-висмут

**Один тот факт, что вода в реакторе работает под давлением 150–200 атмосфер, создает потенциальную опасность. Если давление атмосферное, то этой опасности нет**

начиная от расчетов и разработок и до испытаний и обобщения опыта эксплуатации. А водо-водяными реакторами стали заниматься выпускники нашего факультета, направленные в Курчатовский институт, — Г.А. Гладков, Н.С. Хлопкин, Б.А. Буйницкий и Б.Г. Пологих. Сегодня эти реакторы доведены до высокой степени совершенства.

**Е.К.:** Тогда была другая страна, все было немного по-другому. Надо было найти топливо, материалы оболочки твэла (тепловыделяющего элемента)\* и чехла ТВС (тепловыделяющей сборки)\*\*, определиться с компоновочным решением. Начиная с 1965 г. Научно-исследовательский институт ядерных реакторов (НИИАР) вывозил с Кольского полуострова и Дальнего Востока по 20 сборок в год. Исследование каждой сборки занимало около года. В то время в нашем институте примерно 35–40% объема научно-исследовательских работ были связаны с военно-морской тематикой.

Критической точкой стал 1974 г. В 1969 г. Александр на всех нас сильно рассердился: мол, мы

ничего не понимаем в вопросе радиационных повреждений материалов. Он предложил твэл, который ранее не использовался. Потом была разработана схема распухания топлива (под распуханием понимают относительное изменение объема ядерного топлива, связанное с делением ядер) и повреждения оболочек твэла. Мы создали топливо, которое в отличие от двуокиси урана распухло при работе не наружу, а вовнутрь. Создали твэл с так называемым компенсатором распухания. В 1974 г. сконструировали принципиально новое облучательное устройство, в котором испытали более 2 тыс. твэлов и макетов, и до сегодня с ним работаем. К концу 1980-х гг. схема распухания в твэлах водо-водяных реакторов была отработана. Были созданы новая оболочка, компенсаторы распухания, улучшенное топливо. Это сразу дало резкий рывок в ресурсе твэла.

Изначально на АПЛ в нашей стране реакторы имели горизонтальное расположение, как и было в проекте Георгия Ильяча, но не получилось. Перешли на вертикальное расположение.

**— Вертикальные реакторы безопаснее?**

**Е.К.:** Николай Антонович Доллежал, главный конструктор, тогда отказался от горизонтального расположения, потому что возникали проблемы при перегрузе топлива. Главный создатель уран-бериллиевого твэла для реакторов со свинцово-висмутовым теплоносителем — Владимир Александрович Малых. У меня в то время на реакторе МИР были две петли специально для испытаний таких твэлов. Было достигнуто высокое выгорание, намного превышавшее проектное значение, заданное в тактико-технических характеристиках. Судьба твэла для реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем тоже зависела от распухания топлива и материала оболочки. Сейчас те лодки уже все списаны, но тогда их называли «лодки-истребители», они ходили с рекордной скоростью — 80 км/ч.

**— Хорошая скорость. Они от торпед могли уходить?**

**Е.К.:** И уходили. Американцы внесли их в Книгу рекордов Гиннеса.

В Обнинске в ФЭИ было два наземных стенда-прототипа — один с водо-водяным реактором, а другой — со свинцово-висмутовым. Нужно было создать системы управления и защиты. Советский Союз первым в мире применил в качестве нейтронно-поглощающего материала европий — 63-й элемент периодической системы Менделеева. Использование европия имело огромные последствия. Это исключительно сильный гамма-источник. На нашу долю выпало обоснование стойкости стержней регулирования ядерных реакторов. Мы обосновали радиационную стойкость поглощающих материалов на основе европия.

Мы отработали на наших петлевых установках также двухфазный метод дезактивации.

Радиоактивность была большая, и поверхности и контуры нужно было дезактивировать. Это было очень давно, чуть ли не 40 лет назад.

На сегодня мы уже закончили работы по кораблям проекта 955 («Борей») — «Юрий Долгорукий», «Владимир Мономах», проекта 885 («Ясень») — «Северодвинск». Но обоснование радиационных характеристик ТВС этих проектов мы сделали еще в 1986 г. Цикл обоснований активных зон занимает длительное время. Вначале проходят петлевые испытания, потом создается зона, она идет на ле-

трудом. Не было ни отечественного, ни зарубежного опыта, мы были первыми. Именно поэтому на начальном этапе было много неудач, вплоть до того, что на реакторе первой опытной подводной лодки случилась серьезная авария. Но мы сделали правильные выводы. Хотя в результате этой аварии часть зоны расплавилась, воздух в отсеке остался чистым, а контур — герметичным. Это был важный момент. Специалисты ФЭИ В.И. Субботин, Ю.И. Орлов и П.Н. Мартынов решили проблему технологии теплоносителя, что



Атомная подводная лодка принимает участие в плановых летних учениях Тихоокеанского флота на Камчатке (фото: РИА Новости)

докол, а после успешных испытаний — на лодку. Потом твэлы везут обратно в НИИАР для исследования. Только через 15–17 лет дается заключение, насколько хороши твэл и его ресурс.

— **Какое самое сложное решение было в вашей карьере?**

**Е.К.:** Самое сложное — доказать другим, что ты прав. Нужно было доказать научному сообществу, что мы создали топливо, распухающее вовнутрь. Это удалось сделать лишь спустя десятилетие, после изучения большого числа твэлов.

Трудно было создать специальное устройство, в котором можно было быстро менять негерметичный твэл на новый. С коллегами из ФЭИ мы сделали такое устройство и для теплоносителей на основе свинца-висмута, которое позволяло бы разбирать топливную сборку в «горячих» камерах, при температуре выше 150° С, с помощью манипулятора.

**Г.Т.:** У меня самым сложным было не совсем мое личное решение. Подводные лодки с теплоносителем свинец-висмут осваивались с большим

потребовало около 15 лет. Из восьми подводных лодок с такими реакторами досрочно выведены из состава ВМФ были три: две опытных и одна головная лодка. Пять серийных АПЛ эксплуатировались надежно. Очень трудно было доказать военно-морскому сообществу, что причины аварии — самой первой — связаны с теплоносителем.

Опытные лодки прекратили свое существование в конце 1990-х гг., по НТВ даже был показан очень интересный получасовой фильм «Заказ Русанова» из серии «Тайны забытых побед». Их списали, потому что содержать на базе было очень трудно, ведь теплоноситель требовалось держать все время в жидком состоянии. моряки сказали: «Представьте, что у вас есть скоростной автомобиль, но, приехав домой, вы не можете заглушить двигатель. Если вы не решите эту проблему, нам такие машины не нужны».

— **Их можно понять...**

**Г.Т.:** Проблема была решена, но к тому времени Советский Союз уже распался, стали успешно

эксплуатироваться водяные реакторы, и это направление атомного флота закончило свое существование.

Сегодня разрабатываются гражданские реакторы СВБР-100 с теплоносителем свинец-висмут именно на основе опыта, который был получен на подводных лодках. Новая конструкция более совершенна, но сама технология была освоена раньше.

**Е.К.:** Работать со свинцово-висмутовым теплоносителем действительно было непросто: содержание растворенного в нем кислорода должно находиться в ограниченном диапазоне. Это научились

**— Но это же гарантированная лучевая болезнь!**

**Г.Т.:** Это не так. Теплоноситель дает слабое проникающее гамма-излучение. Основной фактор опасности — поступление полония (это альфа-излучатель) в организм при вдыхании воздуха, загрязненного аэрозолями этого вещества. Для контроля все регулярно сдавали биологические пробы на радиометрический анализ. Поэтому было объективно установлено, что никто из персонала не получил дозу внутреннего облучения полонием, превышающую лимит по санитарным нормам.



Атомная подводная лодка «Самара» на генеральной репетиции военно-морского парада и театрализованного представления, посвященных Дню Военно-Морского Флота, 2010 г. (фото: РИА Новости)

делать, но не сразу. Потом мы и на воде достигли такой же скорости, как и на свинце-висмуте. Мировой рекорд скорости принадлежит водо-водяной лодке, не свинцово-висмутовой.

Была еще другая, не менее важная проблема. Необходимо найти сталь, которая может работать долго, не меньше 7 тыс. часов.

**Г.Т.:** Сегодня технологии ушли далеко вперед. В ФЭИ в отделении А.Е. Русанова получены результаты испытаний стали при температуре 620° С: 50 тыс. часов без следов коррозии. Так что сегодня эта проблема решена.

**Е.К.:** Что касается радиационной опасности. На первой установке в Обнинске были течи теплоносителя в отсек. Это был 1960 г.

**Г.Т.:** Потом этот теплоноситель удаляли ломками как твердые отходы.

В 1990 г. американские медики опубликовали статью. В США на крупном заводе, где делали чистый полоний, исследовали смертность персонала (4,5 тыс. человек) спустя 40 лет. Сравнили со средней смертностью в штате Огайо и в Соединенных Штатах. Согласитесь, 4,5 тыс. человек — весьма представительная группа. Оказалось, нет абсолютно никакой корреляции продолжительности жизни и того, работал человек с полонием или нет.

**Е.К.:** Я читаю студентам лекции и говорю: первое место среди факторов, влияющих на продолжительность жизни, занимает курение, которое сокращает нам жизнь в среднем на 3,5–4,5 тыс. дней (9–12 лет). На седьмом месте стоит онкология. Воздействие радиации только на 102-м месте: 0,002 дня, т.е. три минуты.

**Г.Т.:** У нас санитарные правила чрезмерно жесткие, это все признают. Если фон превышает 50 мЗв (миллизиверт) в год, начинается отселение. А международный конгресс по радиационной защите говорит, что если фон ниже 150 мЗв, то нет никаких признаков радиационного воздействия.

**Е.К.:** Там, где сегодня проходит шоссе Самара — Москва, есть ледниковые озера, радиационный фон которых составляет 450 мкр/ч (микрорентген в час)\*\*\*. А в Бомбее — 6,5 тыс. мкр/ч! И люди живут там уже 10 тысяч лет. Все теории о вреде или пользе радиации недоказуемы. Но психологически радиация очень страшна.

— Да, люди боятся.

**Е.К.:** В 22–23 года мы совершенно спокойно курили на крышке реактора. Но все-таки внутреннее альфа-излучение — это достаточно сложно. Его надо опасаться больше всего, а совсем не внешнего гамма-излучения.

— **Какие перспективы у нашего подводного атомного флота, подводной атомной энергетики?**

**Г.Т.:** По сравнению с американскими АПЛ наши лодки более компактные, обладают лучшими характеристиками. Я не согласен только с тем, что водоохлаждаемые реакторы — это венец творения. Один тот факт, что вода в реакторе работает под давлением 150–200 атмосфер, создает потенциальную опасность. Надо, чтобы конструктор-проектировщик правильно использовал эти факторы, и тогда у нас получится установка более безопасная, а возможно, и более экономичная.

**Г.Т.:** Я был на конференции в Ницце в 2011 г., вскоре после аварии на АЭС «Фукусима-1». Туда председателем комиссии по атомной энергии Франции был приглашен Сергей Владиленович Кириенко. На специальной сессии он сделал очень интересный доклад — об ответных действиях «Росатома», обозначив три этапа. Первый, ближне-срочный этап, уже завершен, это стресс-тесты всех действующих АЭС, тренировки, учеба, мобильное электро- и водоснабжение. Среднесрочный этап — переработка проектов строящихся АЭС, чтобы их безопасность в большей степени опиралась на пассивные системы, не требующие электроэнергии. Третий этап он назвал дальнейшим — это переход к технологиям естественной безопасности, т.е. когда законы природы устраняют факторы риска. В частности, тяжелые жидкометаллические теплоносители — сплав свинец-висмут в СВБР-100 и свинец в реакторе БРЕСТ — устраняют основные факторы потенциальной опасности. Они не горят, не взрываются и не требуют высокого давления. Это придает реакторам свойства внутренней самозащитенности.

— **Такой реактор, как мне кажется, должен быть и более мобилен?**

**Г.Т.:** Мобильность зависит от того, какова мощность, можно ли транспортировать, много ли систем безопасности. Если говорить о реакторах малой мощности, то это плавучие АЭС. «Михаил Ломоносов» — это же тоже мобильный реактор. Я думаю, что если бы делали такой проект со свинцом-висмутом, то он бы был более компактным, более простым. Я много лет общаюсь с офицерами, которые занимаются эксплуатацией и жидкометаллических, и водяных реакторов. Они говорят, что в походе гораздо проще эксплуатировать как раз жидкий металл. Сложности возникают когда лодка стоит на базе, т.к. необходимы специальные условия. Сегодня и они уже преодолены, но когда-то это был браковочный признак.

**Е.К.:** Теперь я отвечу на ваш вопрос о судьбе русского атомного подводного флота. Советский Союз построил 248 подводных лодок, Соединенные Штаты — 122. Мы окружили Америку в 25-мильных зонах, подлетное время исчислялось минутами...

## Построив 12 лодок класса «Юрий Долгорукий» и «Владимир Мономах», мы можем быть спокойны

Сейчас мы берем не количеством, а качеством. Противоборство идет в системе равновесия сил, ответного удара, или, как говорила госпожа Тэтчер, в равновесии страха. Построив 12 лодок класса «Юрий Долгорукий» и «Владимир Мономах», мы можем быть спокойны — они нам все это обеспечат.

Мы можем гордиться тем, что создали и Советский Союз, и современная Россия. На всех этапах развития. Сегодня при помощи компьютерной мышки можно управлять всем реактором. Куда техника шагнула — и куда шагнет еще!

Беседовал Валерий Чумаков

\* **Твэл** (тепловыделяющий элемент) — элемент активной зоны гетерогенного ядерного реактора, стержень, содержащий ядерное топливо.

\*\* **ТВС** (тепловыделяющая сборка) — для загрузки в реактор стержневые твэлы собирают в пучки, при этом их параллельность и определенный зазор обеспечиваются с помощью дистанционирующих решеток.

\*\*\* **100 рентген** = 1 зиверт (с оговоркой, что рассматривается биологическое действие рентгеновского излучения или другого фотонного излучения (например, гамма-излучения)).



Мы говорим — Арктика,  
подразумеваем —

**«РОСАТОМ»...**



## «Для “Росатома” перспективность арктического региона связана прежде всего с освоением обнаруженных в последнее десятилетие ресурсов углеводородного сырья».

Профессор кафедры проблем безопасного развития современных энергетических технологий МФТИ, академик РАН

**Ашот Аракелович  
САРКИСОВ**

**В** арктическом регионе «Росатом» традиционно широко представлен и очень активно работает в различных секторах экономики и военного дела. И это вполне естественно, поскольку атомная энергетика характеризуется по крайней мере двумя качествами, которые делают ее весьма привлекательной для применения именно в Арктике.

Первое — это высокая энергоемкость ядерного топлива, позволяющая обеспечить высокую автономность ядерных установок, что особенно важно для отдаленных труднодоступных регионов с суровым климатом, в условиях бездорожья, трудных транспортных коммуникаций и т.д. Второе — свойственная ядерным энергоисточникам экологическая чистота, которая безусловно обеспечивается, когда атомная энергетика функционирует в нормальном штатном режиме. Этот фактор особенно актуален для Арктики с ее уникальным и очень чувствительным к антропогенным воздействиям природным ландшафтом.

Именно в арктическом регионе были построены и работают две самые северные в мире атомные электростанции: самая северная из них, Билибинская АЭС, с четырьмя блоками по 12 МВт и Кольская АЭС, где работают также четыре блока, но более мощных — по 440 МВт.

Исключительно важен в экономическом отношении вклад «Росатома» в такой уникальной отрасли, как коммерческий атомный ледокольный флот.

Попытки создания коммерческих атомных судов предпринимались в Германии, в Соединенных Штатах и в Японии, но все они оказались безуспешными. И лишь Советский Союз в свое время нашел правильную нишу для применения атомных установок в коммерческом флоте, а именно — создал первый в мире и до сих пор единственный ледокольный атомный флот. Было построено восемь атомных ледоколов, которые обеспечивали решение целого ряда вопросов начиная от освоения природных ресурсов и заканчивая обеспечением навигационной деятельности других судов по Северному морскому пути. Кроме того, в годы существования СССР вдоль Северного морского пути на побережье нашей страны были установлены 396 радиоизотопных термоэлектрических

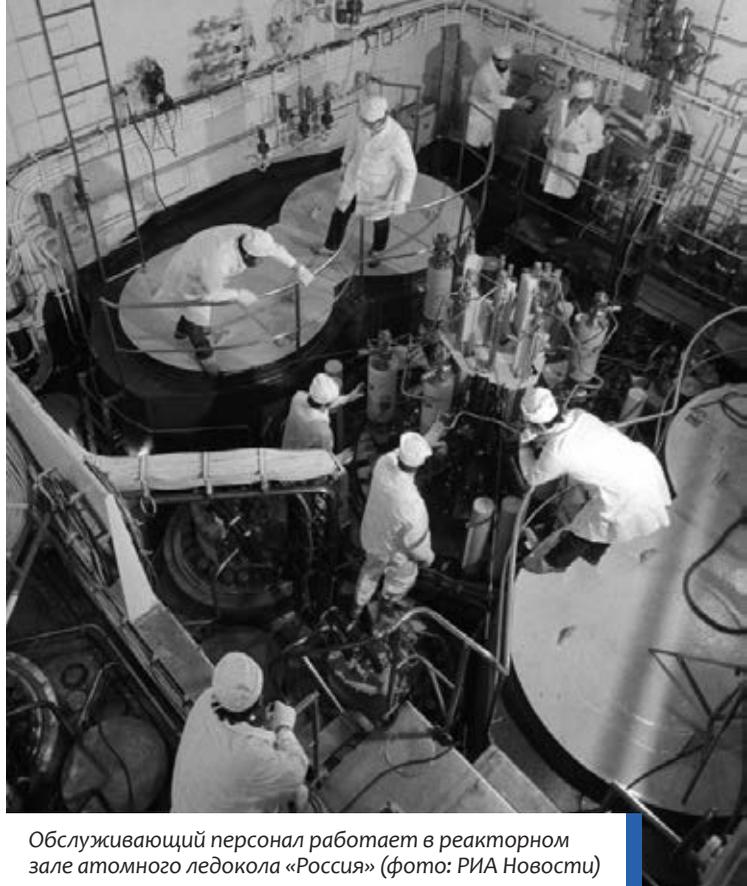
генераторов (РИТЭГ), которые снабжали питанием световые маяки, предназначенные для обеспечения навигации по Северному морскому пути. В качестве основного источника тепла в них используется стронций-90. Сейчас все эти генераторы практически демонтированы и утилизированы.

Еще одна область безусловной компетенции «Росатома» на нашем Севере — военно-морской флот. Это необходимая составляющая нашего государственного суверенитета, государственной безопасности. Поскольку для Севера и особенно для подводного флота атомные установки более органичны и эффективны, то, естественно, в советские годы мы построили самый большой по численному составу атомный флот, который в свое время состоял из 248 атомных подводных лодок и пяти тяжелых атомных ракетноносных крейсеров. Подавляющее большинство атомных субмарин в связи с истечением срока их эксплуатационного ресурса выведены из эксплуатации и к настоящему времени утилизированы. Массовый вывод из эксплуатации ПЛА, их утилизация, а также радиоэкологическая реабилитация обслуживающей их инфраструктуры стали одной из сложнейших в современной истории экологических проблем глобального масштаба. В настоящее время эта проблема близка к своему успешному завершению. Решение этой задачи осуществлялось в рамках широкого международного сотрудничества многими нашими организациями и учреждениями при безусловной лидирующей роли «Росатома». Завершая этот краткий обзор деятельности «Росатома» в Арктической зоне РФ, нельзя не назвать создание мощного полигона для испытаний атомного оружия на Новой Земле, который внес неоценимый вклад в укрепление суверенитета и безопасности государства.

### АЭС на полюсе

С учетом складывающихся обстоятельств востребованность «Росатома» в решении арктических проблем в будущем будет неуклонно возрастать. Для «Росатома» перспективность арктического региона связана прежде всего с освоением обнаруженных в последнее десятилетие ресурсов углеводородного сырья. В этих отдаленных местах систем централизованного электроснабжения нет. Задача разведки и освоения месторождений может быть успешно решена только при наличии надежных энергоисточников. Согласно проведенному анализу, наиболее подходящими для этой цели применительно к местным условиям будут атомные установки небольшой мощности — от десятков до трехсот мегаватт.

Переход к малой атомной энергетике, т.е. к атомным энергоисточникам малой мощности — это не просто уменьшение мощности, а новое качество. Речь идет о новой идеологии, новой концепции всей атомной энергетике, когда основные работы, связанные с капитальными затратами



Обслуживающий персонал работает в реакторном зале атомного ледокола «Россия» (фото: РИА Новости)

на сооружение станций, переносятся с места монтажа атомных установок на предприятие, т.е. изготовление станции почти на 90% будет осуществляться в цехах. На месте будет производиться только монтаж готовых блоков.

Модульная конструкция — главная особенность таких установок — придает им особую гибкость: из отдельных модулей можно составлять блоки самой разной мощности в зависимости от потребности.

Еще одно немаловажное достоинство заключается в том, что все наиболее радиационно опасные операции, связанные с загрузкой атомного топлива, с обращением с жидкими и твердыми отходами переносятся на предприятие, где имеются оптимальные для этого условия и квалифицированный персонал.

И, наконец, следует обратить внимание на высокую степень автономности малых атомных станций. Сейчас физика вполне позволяет создавать установки, которые обеспечивают непрерывную работу таких атомных источников в течение 25 и 30 лет без перегрузки ядерного топлива.

В создании атомных энергоисточников малой мощности наша страна имеет хороший научно-технический задел, а в отдельных направлениях и очевидный приоритет. Близится к завершению строительство первой в мире плавучей АЭС. По ряду причин в головном образце не удалось реализовать все потенциальные возможности, в частности чрезмерно высокой оказалась ее стоимость. Причины всех недостатков первой плавучей АЭС ясны, равным образом как ясны и пути их преодоления в последующих серийных образцах.

Анализ показывает, что в мире существует огромная потребность в транспортабельных установках подобного типа. Эти установки могут работать по лизинговому принципу, т.е. АЭС доставляется к месту эксплуатации, отрабатывает положенный срок, а затем возвращается на предприятие для обслуживания, перегрузки активной зоны и выполнения других необходимых операций.

Второй проект, который у нас активно разрабатывается, тоже пионерский и, безусловно, инновационный: это реактор на быстрых нейтронах СВБР-100 со свинцово-висмутовым теплоносителем — модульный блок мощностью 100 МВт, из которого можно составлять кратные этой величине комплексы большей мощности.

Установка разрабатывается «Росатомом» в партнерстве с частной организацией. Сейчас ведутся проектные работы. Принципиально решен вопрос о размещении головного реактора для испытаний в Димитровграде. Направление очень перспективное, его надо дальше развивать.

Если говорить о малой атомной энергетике в широком плане, то в первую очередь она предназначена для снабжения электроэнергией отдаленных локальных регионов, не имеющих собственного энергоснабжения. Это могут быть несколько населенных пунктов и примыкающие к ним промышленные предприятия.

Другая область применения малых атомных электростанций — для разворачивания так называемых региональных энергетических сетей. Такая идеология может быть реализована в Сибири, на Дальнем Востоке, в некоторых арктических регионах.

Кроме этого, атомные энергетические установки можно использовать для снабжения отдельных крупных промышленных объектов, таких как буровые установки, горно-обогатительные комплексы, металлургические предприятия. Это установки совсем небольшой мощности. Технических препятствий для создания таких установок — надежных, с большой автономностью и высокоэкономичных — не имеется.

И, наконец, малые атомные установки будут востребованы для производства водорода и других вторичных энергоисточников, для опреснения воды и т.д., т.е. прогнозируемая сфера применения атомных установок малой мощности весьма широка. Так что роль «Росатома» в развитии малой атомной энергетике для Севера, для арктического региона и прилегающих территорий, а также для отдаленных территорий нашей страны, где отсутствует централизованное электроснабжение, трудно переоценить. Именно здесь, по нашему мнению, открываются огромные возможности для развития нового направления атомной энергетике.

Исторически атомная энергетика развивалась в направлении создания крупных энергокомплексов с блоками мощностью от гигаватта и выше.

Теперь мы стали свидетелями возникновения совершенно нового направления, связанного с принципиально другим подходом, с другой идеологией и с новыми технологиями. Даже институционально-правовая база этой малой энергетике и то специфична. Во всяком случае, той правовой базы, которая сегодня регулирует деятельность всей нашей большой атомной энергетике, здесь оказывается недостаточно.

Детальные экономические расчеты эффективности использования в Арктике ядерной энергетике провести очень трудно. Для этого требуется учесть очень много параметров, которые на сегодня недостаточно понятны. Например, запасы того же углеводородного сырья: если они небольшие, то смысла вкладывать огромные деньги в то, чтобы там развивать инфраструктуру, нет.

Но сегодня есть весьма обнадеживающие данные, согласно которым минимальная оценка открытых запасов углеводородного сырья в арктическом регионе — примерно 250 млрд т условного топлива. Если исходить из нынешней годовой добычи, этого объема должно теоретически хватить

## Полигон для испытаний атомного оружия на Новой Земле нес неопределимый вклад в укрепление суверенитета и безопасности государства

значительно более, чем на 100 лет. Эта оценка уже дает основание, чтобы вкладывать большие деньги в укрепление и обозначение нашего присутствия и нашего права на освоение этих запасов. Не только на суше, не только на шельфе, но и дальше — там, где мы имеем право претендовать на экономическое владение этими акваториями.

### Вперед — самый полный

Что касается атомного ледокольного флота, из восьми построенных ледоколов сейчас в эксплуатации находятся четыре. Пятый, «Советский Союз», находится в эксплуатационном резерве.

Анализ показывает, что в этих регионах для обеспечения навигации, научно-исследовательских работ и транспортировки добываемого топлива требуется непрерывное функционирование четырех-пяти ледоколов. Поэтому планы построены таким образом, чтобы не снижать этот уровень.

Сейчас спроектировано три корабля нового типа — универсальные ледоколы. Они имеют двойную осадку, максимальная — 10,8 м, а минимальная — 8,5 м. При вхождении в устье северных рек, где глубина маленькая, они осадку будут уменьшать, а при работе в более полноводных районах — увеличивать. Первый ледокол этой серии должен быть спущен на воду в 2016 г.

Кроме того, проектируются ледоколы лидерского класса — с более мощными энергетическими установками. Сейчас атомные ледоколы работают беспрепятственно в течение осенне-летнего периода — до сентября. В зимне-весенний период они обеспечивают навигацию только в западных районах арктического региона. Новый ледокол будет иметь возможность работать в течение всего года и в восточных районах Арктики, и в приполюсных акваториях арктического региона. Проходимость их будет уже неограниченная.



Атомный ледокол «Ленин» (фото: РИА Новости)

Энергетические установки для той серии ледоколов, которые сейчас находятся в стадии строительства, резко отличаются от энергетических установок предыдущего поколения. Их главные отличия — это, во-первых, более высокая степень конструктивной интеграции (парогенераторы находятся внутри корпуса реактора), что обеспечивает компактность, легкость и надежность; во-вторых — повышенная безопасность, связанная с тем, что эти установки находятся внутри бетонного колпака, окружающего реактор, как это сделано на всех современных атомных электростанциях. Это первые судовые установки, которые отвечают требованиям МАГАТЭ по безопасности.

По всем параметрам сегодня атомное ледокольное судостроение более перспективно, чем дизельное. Например, если дизель-электрический

ледокол может находиться в автономном плавании с учетом ограниченности топлива не более двух месяцев, то атомный может функционировать до пяти лет без зарядки активной зоны. Важно также и то, что в отличие от установки, использующей углеводородное топливо, загрязнение окружающей среды нехарактерно для атомной энергетической установки. С точки зрения освоения нашего Севера я также не вижу альтернативы атомным ледоколам.

### Культура безопасности

Атомная энергетика имеет свои особенности, что, к сожалению, служит основой для неоправданных представлений о ее чрезвычайной опасности. Атомная энергетика появилась как побочный продукт разработки атомной бомбы, поэтому в массовом сознании она ассоциируется с атомным оружием. Другая причина настороженного, а часто и негативного отношения к атомной энергетике связана с особенностями радиационного воздействия. Воздействие радиации на организм совершенно незаметно, а последствия при высоких дозах облучения могут быть весьма опасными.

В то же время существует и ряд собственных атомной энергетике объективных факторов, которые представляют собою источники потенциальной опасности. Один из них — это высочайшая концентрация энергии в единице объема. Потенциальная энергия, заключенная в активной зоне атомного реактора, на семь порядков выше, чем энергия пароводяной смеси в паровом котле электростанции такой же мощности.

Еще одна особенность, с которой нельзя не считаться и которая представляет потенциальную опасность, — состояние мгновенной критичности.

Это неуправляемая цепная реакция деления, которая может возникнуть при определенных физических условиях. Ни в одном способе генерации энергии подобного явления нет. Поэтому в конструкции реактора предусмотрено все, чтобы это состояние никогда не достигалось. Но теоретически оно достижимо и поэтому представляет собой реальный фактор опасности.

Специфическая особенность ядерной энергетики — остаточное тепловыделение, которое выступает еще одним потенциальным источником и фактором опасности. Любой другой источник энергии после выключения через короткое время достигает мощности, равной нулю. При выключении атомной установки генерация тепла продолжается в течение многих часов, дней и месяцев за счет остаточного тепловыделения. Причем эта генерация

реализуется на достаточно высоком уровне, который заставляет обеспечивать отвод тепла в течение длительного времени после выключения реактора. Кстати, на «Фукусиме» все неприятности произошли из-за того, что из-за остановки генераторов не был обеспечен отвод этого остаточного тепловыделения. Сейчас уровень развития атомной техники таков, что степень ее безопасности значительно превосходит степень безопасности в других энергетических технологиях. Атомные установки на сегодня — самые безопасные, а стандарты их безопасности — самые высокие. Не случайно термин «культура безопасности» возник внутри атомной энергетики. Эти философия и идеология сейчас постепенно распространяются и на другие отрасли нашего энергетического комплекса.

Для того чтобы население воспринимало атомную энергетику адекватно, надо воспитывать в людях ее правильное понимание начиная со школьной скамьи, продолжать это обучение в вузе, независимо от специальности, и дальше — на протяжении всей жизни человека.

Такая работа очень эффективно проводится во Франции. Отношение к атомной энергетике там очень спокойное, здоровое и вполне адекватное. Там более 70% энергии производится на атомных станциях. Несмотря на это, люди не только не выступают против развития атомной энергетики, но и, напротив, считают, что в значительной мере их благосостояние и экономическое благополучие связаны именно с тем, что в стране так широко и успешно применяется именно этот вид энергетики. Подобная просветительская и образовательная работа должна проводиться систематически, по определенной государственной программе.

Нужно заниматься опережающим проектированием и созданием новым прогрессивных атомных энергетических установок, как это было с атомной подводной лодкой в свое время. Ее никто не просил, а Минсредмаш сделал и предложил, а после оказалось, что подводные лодки могут быть только атомными, потому что только с атомными установками они становятся поистине подводными кораблями, не нуждающимися в периодическом всплытии для зарядки аккумуляторных батарей. Надо не ждать, пока потребители начнут просить, а самим предлагать и выводить на рынок. Идти впереди экономики, а не поспевать за ней.

К великому сожалению, на начальном этапе деятельности «Росатом» и другие организации, которые использовали атомную энергетику, во многом оказались безответственными в том, что касается охраны окружающей среды. Сейчас в ходе масштабных работ по утилизации ПЛА вскрылся колоссальный экологический ущерб, который был нанесен в результате бездумной и безалаберной эксплуатации всего атомно-промышленного комплекса в регионе.

## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### АШОТ АРАКЕЛОВИЧ САРКИСОВ

**Академик, советник РАН, профессор кафедры проблем безопасного развития современных энергетических технологий МФТИ.**

- Родился в Ташкенте.
- В 1941 г. поступил в Высшее военно-морское инженерное училище им. Ф.Э. Дзержинского в Ленинграде. В 1945 г., после службы в армии во время Великой Отечественной войны, продолжил обучение.
- В 1956 г. защитил кандидатскую, а в 1968 г. — докторскую диссертацию.
- 1968 г. — присвоено звание профессора.
- 1981 г. — избрание членом-корреспондентом АН СССР, в 1994 г. — действительным членом РАН.
- С 1982 г. — председатель экспертного совета Высшей аттестационной комиссии РФ по проблемам флота и кораблестроению.
- С 1990 г. — заведующий отделом прикладных проблем ядерной энергетики Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН, Москва), советник Российской академии наук.
- С 1997 г. — заместитель председателя научного совета РАН по ядерной энергетике.
- С 1998 г. — председатель экспертного совета Международной программы по радиоактивным отходам (МНТП РАО — *ATRP*).
- С 2004 по 2007 г. — научный руководитель разработки Стратегического мастер-плана по утилизации выведенных из эксплуатации объектов атомного флота и экологической реабилитации обслуживающей инфраструктуры.
- С 2011 г. — главный редактор академического журнала «Арктика: экология и экономика».
- Вице-адмирал, участник Великой Отечественной войны, награжден десятью орденами и более чем 40 медалями.
- Лауреат международной премии «Глобальная энергия» (2014), премии Правительства РФ (2013), золотой медали РАН им. академика А.П. Александрова (2007).

На новом этапе использование атомной энергетики в Арктике должно реализовываться с более высокой степенью ответственности, по более строгим стандартам, обеспечиваться самыми современными технологиями, что станет гарантией экологической безопасности всего этого региона. ■

*Подготовил Валерий Чумаков*



## **«Россия была пионером и остается**

одним из мировых лидеров в производстве сырьевых медицинских изотопов.

# **ИЗОТОПЫ на страже здоровья**

### **Такие разработки означают**

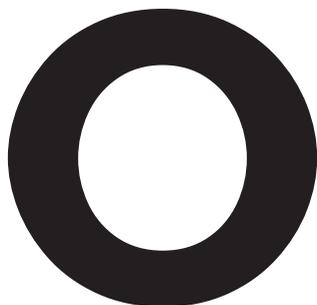
возможность диагностики и лечения ряда серьезных заболеваний – онкологических, кардиологических, неврологических. Однако, имея мощный фундаментальный задел, мы почти не развивали производство медицинской аппаратуры, что сейчас привело к почти кризисной ситуации. Медики и физики решили объединиться для решения этих проблем. Они считают, что у нас есть все основания для оптимизма».



А.Д. Каприн — директор Национального медицинского исследовательского радиологического центра, член-корреспондент РАН



В.П. Смирнов — заместитель генерального директора управляющей компании «Наука и инновации» госкорпорации «Росатом», академик РАН



том, каким образом можно решить вопросы обеспечения наших пациентов высококвалифицированной медицинской помощью и какие проблемы ждут нас на этом пути, мы беседуем с **Андреем Дмитриевичем Каприным**, директором Национального медицинского исследовательского радиологического центра, членом-корреспондентом РАН, и **Валентином Пантелеймоновичем Смирновым**, академиком РАН, заместителем генерального директора управляющей компании «Наука и инновации» госкорпорации «Росатом», научным руководителем электрофизического блока.

— **Ведь это не случайно — то, что вы сидите сегодня рядом? И вообще вы, видимо, по жизни идете теперь рядом?**

**В.С.:** «Росатом» все знают: это атомная энергетика, ядерное оружие. Но создание исключительно сложных и мощных объектов атомной энергетике привело к тому, что наши возможности чрезвычайно расширились и мы смогли создавать новое оборудование для применения в различных областях науки и техники, в частности в медицине. Мы занимались развитием ускорителей, которые нашли свое место в терапии, создавали и создаем изотопы, которые получают применение в радиофармпрепаратах и в установках для брахитерапии, диагностике различных заболеваний — от неврологии до онкологии.

**А.К.:** Мы очень рады этому, поскольку в теперешних условиях не можем быть заказчиками импортной аппаратуры, необходимой для диагностики и лечения. За рубежом сейчас продолжается развитие этих методик, хотя именно наши физики стали родоначальниками многих направлений в ядерной медицине и высокоэнергетической радиологии.

В 1990-е гг. у нас в стране печальной тенденцией стало прекращение финансирования таких проектов, и больше всего пострадало как раз это направление. После перестройки мы стали покупать необходимую аппаратуру за рубежом, где в этом отношении продвинулись довольно далеко. Но сейчас все наши надежды связаны как раз с возобновлением таких прикладных исследований в России. Это радионуклиды, радиофармпрепараты,

различные методики в терапии, которые когда-то зародились еще в Советском Союзе. Это различные виды нейтронозахватной терапии, терапия быстрыми нейтронами и т.д. Как говорится, нет лучшего нового, чем хорошо забытое старое. Уверен, что наши физики способны создавать оборудование ничуть не хуже, а может быть в чем-то лучше западного. Тем более что другого выхода у нас просто нет.

**В.С.:** Андрей Дмитриевич коснулся исключительно важного аспекта нашего развития на современном этапе. Мы можем делать «железо», пучки, излучатели нейтронов, рентгеновские аппараты и т.д., но мы должны делать это по заданию медиков. Только они могут определить, что нужно в первую очередь, и тогда мы решим, как построить технические и физические системы, чтобы это удовлетворяло медицинским целям и потребностям пациентов.

**А.К.:** Мы, конечно, это понимаем. Вот поэтому и создаются междисциплинарные комиссии, рабочие группы. По распоряжению министра здравоохранения В.И. Скворцовой сформирован научный совет по ядерной медицине, в который входят представители «Росатома», директора крупных институтов, в том числе Объединенного института ядерных исследований в Дубне, Физико-энергетический институт... Тут важно заранее провести аудит ситуации и подготовить ответы, где конкретно необходимы медицинские центры с соответствующей аппаратурой.

**— Правильно ли я понимаю, что все это только в перспективных планах?**

**В.С.:** Нет, неправильно. Есть оборудование, которое так или иначе было у нас развито в прошлом и развивается сейчас. Оно всегда находило свое клиническое применение. Хотел бы прежде всего упомянуть пионерскую разработку по брахитерапии — установку «Агат». Наш институт НИИЭФА выпустил более тысячи таких аппаратов. Сейчас аппарат модернизирован, он называется «Агат Smart» и, надеюсь, будет очень востребован в здравоохранении.

**А.К.:** Действительно, «Агат» — прекрасный, очень надежный аппарат, который много раз модернизировался. Принцип его работы таков: из специальной колонки подается изотоп, который позволяет воздействовать на опухоль локально. Это могут быть один, два или три сеанса в зависимости от степени выраженности опухолевого процесса и ряда других факторов. Кстати, аналоги «Агата», работающие на иридии, активно создавались за рубежом, и сейчас порядка 100 таких приборов стоят в ряде клиник Российской Федерации. Они неплохо работают, но проблема в том, что эти колонки надо постоянно заряжать, а это очень дорого. Мы надеемся, что одним из направлений совместной с физиками-ядерщиками

работы станет изготовление иридия, тогда появится возможность заряжать такие аппараты.

**В.С.:** Это возможно, и у нас существует большая программа по развитию изотопов медицинского назначения для брахитерапии и создания радиофармпрепаратов. Более того, часть наших изотопов мы экспортируем за рубеж. У нас по крайней мере четыре института гражданского сектора «Росатома» вовлечены в изготовление изотопов медицинского назначения. В настоящее время у нас, физиков, идет разработка новых систем брахитерапии, которые основаны на использовании не изотопов, а миниатюрных рентгеновских источников, работающих от сети. Это несравненно более удобно. Во-первых, такие аппараты безопасны для персонала, во-вторых, они не разряжаются. Проведенный нами анализ показывает, что мы можем сделать аппарат с параметрами лучшими, чем зарубежные.

**— Если мы — один из мировых лидеров по производству медицинских сырьевых изотопов, почему только сейчас, когда против нас приняты санкции, наконец поняли, что можем не хуже других, а может быть даже лучше?**

**Новые системы  
брахитерапии основаны  
на использовании  
не изотопов, а миниатюрных  
рентгеновских источников,  
работающих от сети.  
Такие аппараты безопасны  
для персонала и они  
не разряжаются**

**В.С.:** Ну, это не совсем правильно. Мы и раньше занимались такими исследованиями, и санкции на изотопы практически никак не повлияли.

**— Но ведь ядерная медицина в нашей стране очень мало развита, разве нет?**

**А.К.:** По количеству работ, которые были сделаны нашими физиками, мы всегда оставались лидерами. Но вот что касается внедрения — да, должен согласиться, с этим слабовато. Аппараты, конечно, были, но их модернизация, может быть, запаздывала. Почему? Система обеспечения медприборами и препаратами так была выстроена, что нам покупали все необходимое за рубежом и это нас устраивало.

**В.С.:** Позвольте мне заступиться за наших медицинских специалистов. Радиологи, работающие в наших центрах, — это ученые мирового уровня. С имеющимся оборудованием они делают, по моему, максимум возможного.

**А.К.:** Но все-таки радиолог должен быть хорошо вооружен. У радиологов есть такой козырь: они говорят, что могут на любом аппарате сделать без осложнений примерно такую же прецизионную терапию. Это, конечно, хорошо, но двигаться-то все равно надо. Мало быть специалистами в импортном оборудовании — надо создавать и осваивать свое. Иначе говоря, у нас есть свой колоссальный задел, мы всегда делали изотопы, мы серьезно продвинулись в борьбе с обезболиванием, особенно костных метастазов, но у нас не было протонных центров. И это упущение надо ликвидировать.

**В.С.:** Это сейчас активно делается. Помимо стандартного оборудования, которое имеется на рынке, есть и некоторые совершенно новые подходы, которые мы совместно с медиками сейчас изучаем. Хотя и имеющееся оборудование мы хотим воспроизвести в усовершенствованном виде.



Роботизированная радиохирургическая система для лечения опухолей

**— Есть ли у вас ощущение, что мы можем догнать и перегнать Запад в плане развития ядерной медицины?**

**В.С.:** Надо быть реалистами. Пока у нас серьезное технологическое отставание, которое мы можем преодолеть, но требуются время и поддержка. И медики, и физики, к которым я отношусь, неоднократно демонстрировали возможность решения очень сложных задач. В ряде направлений мы впереди аналогичных исследований, идущих в мире. Поэтому я оптимист. Главное, чтобы в обществе созрело понимание того, что без развития науки в широком смысле этого слова мы не можем двигаться вперед. И такое понимание, думаю, зреет.

**А.К.:** Зреет. У нас был ужасный провал с кадрами, не было медицинских физиков — сейчас их готовят, в том числе и в регионах. Раньше мы с трудом набирали двух-трех ординаторов, а сейчас молодежь пошла в онкологию. Хотя это тяжелая ноша — такая специальность. Но идут! Хорошие ребята, толковые. Вы заметили, что и в обществе произошли изменения? Многие уже не считают зарубежные клиники панацеей. А это значит, что мы должны конкурировать с лучшими мировыми центрами. Быть не хуже. Или лучше. Правда, есть серьезные проблемы. Одна из них — отсутствие собственных химиотерапевтических разработок. У нас, собственно, своей молекулы нет, мы препарат завозим. Точнее, завозили.

**— С какими же химиопрепаратами вы сейчас работаете?**

**А.К.:** Ну, были деньги, и мы, слава богу, купили на два года вперед.

**— Есть основания надеяться, что через два года будет что-то свое?**

**А.К.:** Вы видите, как быстро развивается мир? Буквально года три назад мы еще разговаривали по мобильному телефону, который с трудом умещался в руке. Такой же прогресс может произойти и в разработках радиофармпрепаратов. Надеюсь на это.

**В.С.:** А вы посетите НИИТФА, посмотрите там на циклотрон производства НИИЭФА, модули синтеза, ПЭТ-центр, который готовится к запуску. Коротко говоря, работа идет. И вот что еще важно: нам необходимо добиваться осознания каждым человеком того, что он делает огромное дело — для конкретных людей, для пациентов, а в конечном счете для самого себя.

**А.К.:** Ну а мы, медики, должны добиться того, чтобы каждый человек понимал: ему надо обследоваться заранее. Если не запускать болезнь, можно в большем количестве случаев обойтись без химиотерапии, радикальными методами либо методами ядерной медицины. Ведь что такое химиотерапия? Это очень тяжелые больные и дорогие лекарства. Есть, например, таргетные (от английского



Физики и медики совместно обеспечивают пациентов высококвалифицированной медицинской помощью

target — «мишень») препараты, которые стоят 250–300 тыс. руб., и это еще до подорожания. Представляете себе такую цену? Далекое не каждому это по карману. А они нужны пожизненно и каждый день. Кто отдаст такой фармацевтический рынок? Никто, конечно. Компании все сделают, чтобы засекретить эту молекулу. Поэтому наша ставка — на раннее обнаружение, регулярное и своевременное обследование. Это, я бы сказал, должно стать патриотическим движением. Без этого никак.

— **В наших поликлиниках каждому пациенту дают направление на ЭКГ и гонят на флюорографию раз в полгода. А вот ранняя диагностика или профилактика онкологии у нас отсутствует. Что должен знать каждый человек?**

**А.К.:** Во-первых, если у человека что-то не в порядке с родинками — зудят, начали расти, то не надо прикладывать лопухи, надо сходить к врачу. Это же просто невежество! Что вы смеетесь? Если вам показать фотографии, будет не до смеха. Или когда молочная железа не вмещается в чашку бюстгалтера, можете такое

представить? В четыре раза больше другой железы! Конечно, в этом вина не только пациента, но и врачей общей практики, которые забыли, что такое осмотр пациента. Онкологическая настроенность — это наша общая врачебная задача, и никто ответственности с нас не снимет.

— **Что еще должно настораживать?**

**А.К.:** Должно быть понимание последствий наличия скрытой крови в кале, например. Есть очень легкий тест, позволяющий понять, нужно ли человеку спешить к онкологу. Вообще после 50 лет во всех развитых странах мужчина каждые три года идет на гастро- и колоноскопию — это если все нормально, а если есть проблемы, то значительно чаще.

— **Знаю, что в некоторых странах, если у человека обнаружили рак и он до этого не обследовался, ему не оплачивают лечение.**

**А.К.:** Да, ему приходит открытка, как на техосмотр. Женщине в 39 лет — обследование шейки матки и молочной железы. Если не явилась, а потом заболела — полный курс лечения за ее счет. Мужчина сдает анализ на простатоспецифический антиген (ПСА). Не сдал в 50 лет — полный курс лечения за его счет. И это правильно.

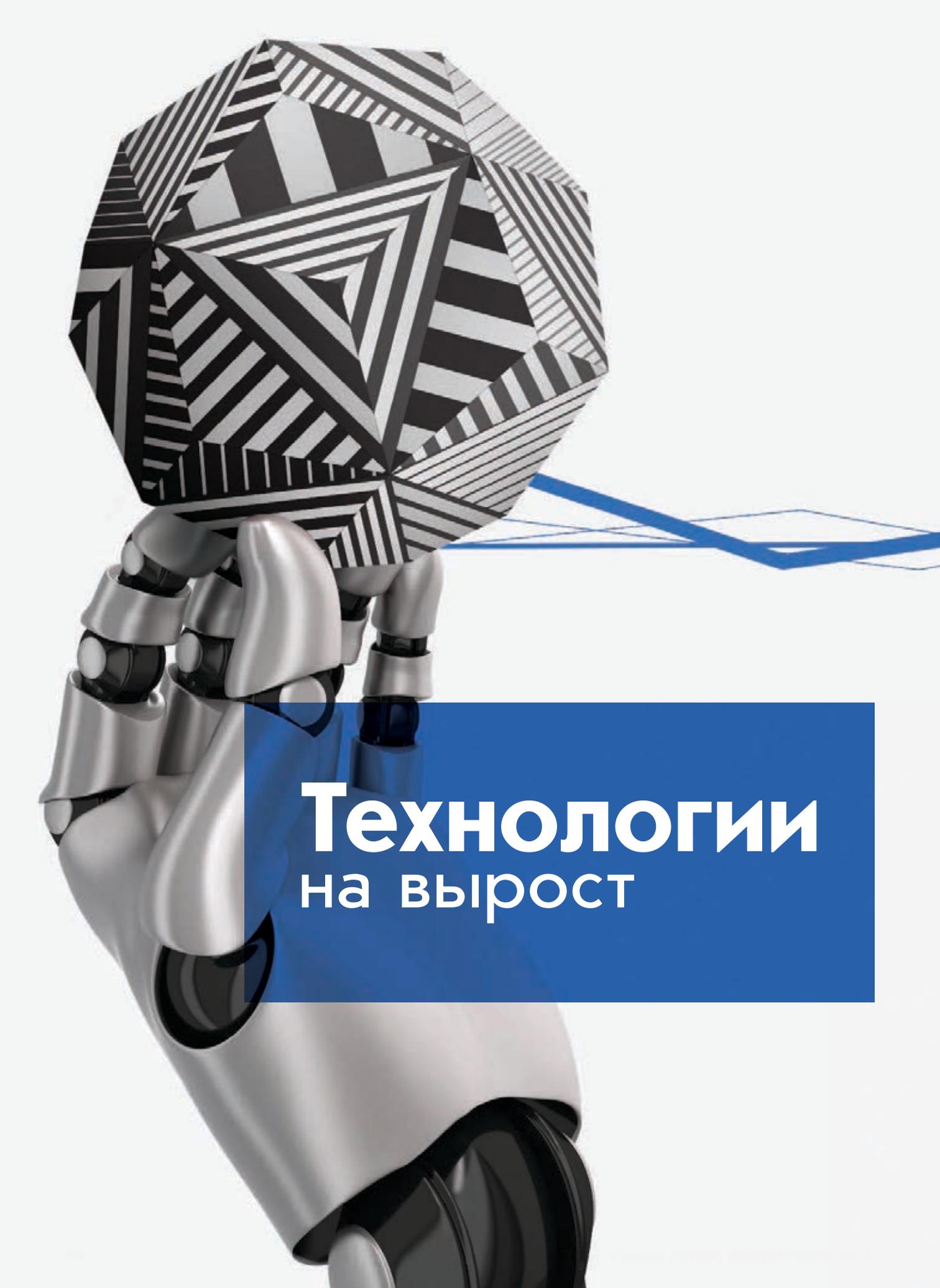
**В.С.:** В свое время я был страшно удивлен, прочитав статистические данные о влиянии дозы облучения на продолжительность жизни человека. Это японские данные. Исследовалась группа из 300 тыс. человек, подвергшихся облучению во время бомбардировки Хиросимы и Нагасаки. Оказывается, с полученной дозой продолжительность жизни растет и даже при очень высоких дозах выходит на среднестатистическую.

— **Потому что они следят за своим здоровьем?**

**В.С.:** Правильно! Все эти люди проходили систематическое обследование, вот и весь секрет. ■

**Многие уже не считают зарубежные клиники панацеей. А это значит, что мы должны конкурировать с лучшими мировыми центрами**

Беседовала Наталья Лескова



# Технологии на вырост



**«Со временем мы получим технологии, которые сделают очень дорогостоящие вещи существенно дешевле и доступнее».**

Генеральный директор АО «Наука и инновации» доктор технических наук  
**Алексей Владимирович ДУБ**



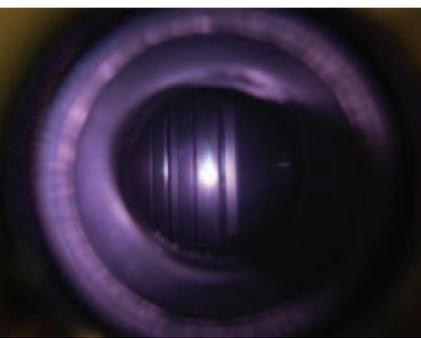
перспективах развития аддитивных технологий, о том, как они изменят нашу жизнь, рассказывает генеральный директор АО «Наука и инновации», входящего в структуру госкорпорации «Росатом», доктор технических наук, профессор **Алексей Владимирович Дуб.**

— **Алексей Владимирович, не успели люди привыкнуть к термину «нанотехнологии», как появились «когнитивные технологии». Теперь новое понятие — «аддитивные технологии». Что это такое?**

— «Аддитивность» — термин физический и математический, в переводе означает «прибавляемость». На самом деле он достаточно старый, просто в повседневную речь стал проникать только сейчас. Термин подразумевает процесс, в котором результат связан со сложением исходных составляющих. Аддитивные технологии — это технологии, результат которых складывается из последовательного накопления одинаковых действий в процессе работы этой технологии. В конечном счете мы сталкиваемся с аддитивными технологиями в процессе, например, роста сталагмитов и сталактитов: стекают и каплют капельки, и потихоньку вырастает такая сосулька.

— **Строительство дома, когда друг на друга кладут кирпичи, тоже подходит под определение «аддитивность»?**

— Да, фактически это тоже аддитивная технология, когда из отдельных микрокирпичиков складывают макрообъект. Но в сегодняшней реальности развитие аддитивных технологий все-таки не столь примитивно. Речь идет о построении довольно сложных макросистем, когда мы на старте закладываем не только форму, но и одновременно свойства необходимого объекта. В этом существенное отличие от того, о чем мы до этого говорили. Грубо говоря, когда токарь обтачивает деталь на станке, он использует заготовку с уже существующими свойствами, которые подходят к производимой детали в той или иной степени. С помощью аддитивных технологий мы сразу вырабатываем деталь с нужными нам свойствами материала.



Плазменные процессы в камере технологического высоковакуумного оборудования; высоковакуумная технологическая установка для космической промышленности



— Присутствует. В дизайне самого изделия, дизайне создания материала.

**— Тогда тот же 3D-принтинг, работающий по компьютерной программе, — один из вариантов аддитивных технологий?**

— Не просто один из вариантов, это и есть инструмент создания изделий на основе аддитивных технологий. 3D-принтинг — последовательное воссоздание формы изделия за счет послойного либо лазерного сплавления, либо, если речь идет, скажем, о пластиках, что на текущий момент наиболее известно и распространено, — простого последовательного наплавления.

### **Мирный «Росатом»**

**— Какое отношение имеет к этому «Росатом»? Мы знаем, что «Росатом» — это ядерные реакторы, энергетика... и вдруг аддитивные технологии?**

**— То есть смысл аддитивных технологий состоит в том, чтобы одновременно с нужной формой получить и необходимые свойства?**

— Не вполне так. Это возможность, отталкиваясь от свойств материала, получить изделие необходимой формы, которая будет точно соответствовать данным свойствам. Это главное.

Теперь второе. Мы должны понимать, что высокие технологии — это все большее отдаление от искусства. Их результат не должен зависеть от таланта или компетенции работника. Вначале металлург или кузнец были в первую очередь творцами. Кузнец ковал, в основном, как чувствовал.

**— Но это же прекрасно: чувствовать металл и ковать в соответствии с чувствами...**

— Это прекрасно, когда мы говорим именно об искусстве. В крайнем случае — о кованой ограде. Но в случае даже самого обыкновенного болта чувства должны уйти на третий план.

**— Ну да, когда речь идет о допусках в доли миллиметра, тут уже по ощущениям двигателю нельзя, нужен хотя бы штангенциркуль.**

— Именно. Поэтому сегодня мы должны стандартизировать любой технологический шаг. В этом смысле творчество лежит за рамками технологического процесса. Оно работает до начала создания формы и материала, из которого форма будет сделана. Сама технология — рутинный процесс, прописанный в регламентах, правилах и т.д.

**— Но творчество все-таки присутствует?**

— «Росатом» — это прежде всего надежность и безопасность. Поэтому все, что он делает, имеет понятный, проверенный и доказанный ресурс и должно соответствовать в определенной форме необходимым свойствам. В этом как раз и состоит наша задача.

После того как «Росатом» стал госкорпорацией, ко всем предыдущим видам деятельности добавились еще требования бизнеса. Поэтому все, что нами реализуется, должно быть эффективно и не в последнюю очередь — экономически эффективно. Использование дорогих материалов, изделия из которых должны быть довольно быстро получены, вызывает необходимость применения новых технологий.

Если классические технологии (сначала получение заготовок из металлов, потом их деформация, механическая обработка) дают коэффициент выхода иногда 20%, а то и меньше, остальное уходит в отходы, стружку, то мы понимаем, что при цене материалов в десятки тысяч долларов за килограмм применение подобных технологий становится весьма неэффективным. Это будет очень затратно. Процесс становится эффективным, когда мы получаем на выходе более 90%.

**— То есть аддитивные технологии — это возможность сэкономить на дорогих материалах?**

— В том числе. Кроме того, это возможность сразу получить необходимую форму, в том числе уникальную, т.е. за относительно короткое время,

в течение одного-двух этапов, сделать готовое изделие. Наконец, это уход от человеческого фактора. Именно рутинное изготовление воспроизводится в наилучшей степени. Все это дает ту самую надежность, о которой я говорил раньше. Не забывайте: надежность в «Росатоме» равносильна безопасности.

### Когда б вы знали, из какого сора...

— **Что используется в качестве исходника?**

— В наших случаях речь идет о металлических порошках. При этом, требования к ним специальные.

— **Какие?**

— Одно из них: после получения или в процессе получения они не взаимодействуют с открытой атмосферой. Чтобы состав никоим образом не мог случайно поменяться.

Далее, нам требуются определенные размеры гранул этих порошков. Их размер — менее 50 мкм.

продуктом стандартизованных технологий. Сегодня, например, *Alstom*, пользуясь именно аддитивными технологиями, делает для газотурбинных двигателей определенного рода детали, скажем, форсунки для подачи топлива, до 80% общего количества. Топливо, которое по ним подается, проходя через внутренние каналы, в том числе выступает в роли охлаждающей жидкости. И за счет беспрецедентных свойств конструкции появляются возможности для самого изделия работать при более высоких температурах. Просто так просверлить эти каналы невозможно, потому что они имеют очень сложные формы, конфигурации. А вот вырастить слой за слоем — пожалуйста.

— **Значит, технологии эти уже работают?**

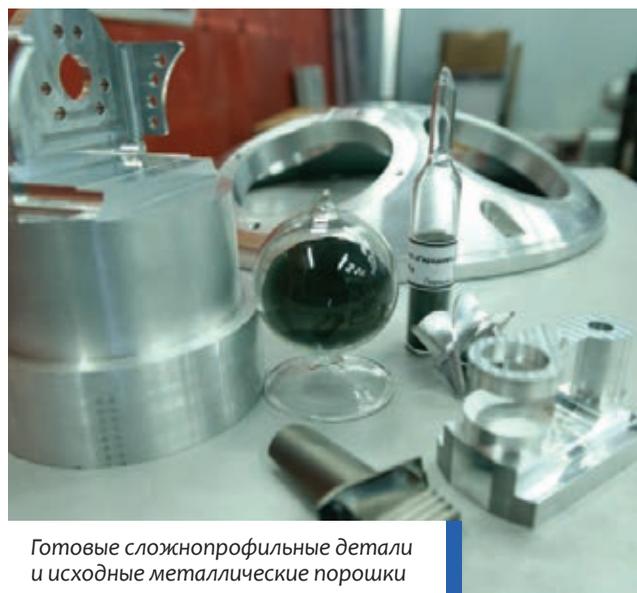
— Как всегда, мы с ними живем. Я недаром привел пример образования сталактита. Каждый из нас примерно представляет себе процесс за-

И это не обычные, относительно дешевые железные или алюминиевые порошки, а высоколегированные стали, никелевые, жаропрочные сплавы, титановые сплавы и т.д., т.е. достаточно сложные, капризные, химически активные вещества. Поэтому технология их наработки контролируется на всех этапах, а стоимость начинается от 5 тыс. рублей за килограмм.

— **С помощью аддитивных технологий можно сделать детали, которые ранее, с другими технологиями, было просто невозможно создать? Например, сплошной куб с полым шаром внутри?**

— Да, есть, конечно, примеры искусства, когда мастера из цельной кости вырезали куб с шаром внутри, но это доступно единицам.

На сегодня в ответственной машиностроении есть категория изделий с внутренними полостями. Они требуются для охлаждения, для подачи разного вида топлива или технологических жидкостей. Такие сделать способами традиционной сварки или механической обработки невозможно. Кроме того, если мы будем применять сварку или какое-то другое соединение компонентов, мы никогда не сможем добиться необходимой надежности или равных свойств в этом сварном шве и в основной детали. Поэтому аддитивные технологии дают конструкторам и нам как конечным пользователям совершенно уникальные возможности. Другими словами, мы можем сделать штучные изделия



Готовые сложнопрофильные детали и исходные металлические порошки

твердевания жидкого металла: берем расплавленный металл, наливаем его в форму, где он постепенно затвердевает. Литье, по сути, — это еще один пример аддитивных технологий.

— **Тогда если можно просто отлить нужную деталь, зачем придумывать новые и отнюдь не простые технологии?**

— При обычном литье возникают дефекты, необходимы технологические приемы, литники,

которые могут составлять до 50% от массы изделия. При очень дорогих материалах это становится весьма затратным и неэффективным.

Я довольно долгое время занимался процессами кристаллизации. Каждый из нас видит нечто подобное, когда играет в «Тетрис», где нужно из падающих блоков разной формы собрать наиболее компактную фигуру. Аддитивные технологии имеют подобную задачу: все укладывается плотными слоями, а в результате получается требуемое изделие. Кристаллизация — это и есть типичный пример естественных аддитивных технологий.

## Надежность в «Росатоме» равносильна безопасности

камере, в этих же условиях, выращивать еще и образец, который и будет потом проходить все необходимые виды испытаний. Должна быть разработана методика, которая покажет, что свойства этого отдельно выращенного образца — в той же

камере, при тех же технологических условиях, — определенные потом в лаборатории, будут точно соответствовать свойствам изделия. В «Росатоме» вопрос ответственности, повторюсь, имеет первостепенное значение. Поэтому понятно, что мы будем уделять ему не меньшее внимание, чем вопросу получения изделий.

**— Чем «Росатом» уже может похвастаться в деле аддитивных технологий, если не секрет?**

### Крепче стали

**— Когда мы говорим о предметах, созданных из сплавленных слоев порошка, у людей может возникнуть впечатление, что они будут ненадежными.**

— Категорически не согласен. Любое ответственное изделие потому и ответственное, что обеспечивает тот ресурс и те характеристики, которые от него требуются. Если можно было какое-то изделие произвести методом порошковой металлургии, то оно выдерживало все свои ресурсные характеристики. Алмаз тверже, чем каменный уголь, но это не делает его в некоторых случаях хуже, чем этот уголь, и наоборот. Поэтому понятно, что вопросам стандартизации и проверкам свойств изделий будет уделяться не меньшее внимание, чем при стандартных операциях.

Но здесь есть и некоторые сложности. При стандартном изготовлении мы всегда отбираем пробу или несколько проб от этого изделия и на них определяем свойства. Таким образом, мы прогнозируем срок службы или другие характеристики этого изделия. В плане производства при помощи аддитивных технологий этого сделать нельзя, потому что смысл в том, что мы сразу получаем готовое изделие без дополнительного объема, который потом отрежут для анализа и прогноза. Поэтому мы одновременно разрабатываем соответствующие технологии и методы пробоотбора.

**— Каким образом?**

— На сегодняшний момент принято одновременно с выращиванием изделия тут же, в этой же

— Ничего секретного нет. Задача внедрения аддитивных технологий разбивается на пять основных частей — и организационных, и содержательных.

**Первое.** Мы понимаем, для чего нам это надо, мы сами себе заказчик и потребитель.

**Второе.** Необходимо разработать дизайн. «Росатом» располагает в высшей степени компетентными конструкторами, поэтому мы можем разработать конструкцию полностью, от начала и до конца.

**Третье.** Мы можем разработать необходимое и очень сложное программное обеспечение, и мы это делаем на предприятиях «Росатома», например в Сарове.

**Четвертое.** Порошки, материалы, из которых это делается. В «Росатоме» существуют материаловедческие центры: Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности (АО «Гиредмет»), Научно-исследовательский институт химической технологии (ВНИИХТ), Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара (ВНИИНМ), материаловедческий институт ЦНИИТМАШ, «Луч». Есть организации, которые профессионально занимаются порошками и знают, как их делать.

**Пятое.** Изготовление 3D-принтера. Это сложная механика, это лазеры. В «Росатоме» очень много занимались лазерными системами и вопросами точной механики. Поэтому все пять составных частей у нас в наличии на самом высоком уровне.

— **И вы в этом вопросе самодостаточны?**

— Вполне, но это не значит, что мы не собираемся ни с кем сотрудничать. Мы уже вошли в альянсы с ведущими вузами. Это и МИФИ, наш национальный ядерный университет, различные материаловедческие вузы, такие как Московский институт стали и сплавов, Санкт-Петербургский политехнический университет. Конечно, это и академия наук, и другие госкорпорации, в которых мы видим потенциальных потребителей подобных изделий, с которыми мы можем сотрудничать: «Роскосмос», «Росавиация», «Ростехнологии». Самое главное — что мы понимаем, как сделать техническое задание. Правильные условия задачи — это уже на две трети ее решение.

Любая технология реально становится достоянием людей, неким технологическим этапом, когда входит в жизнь многих. При этом следует понимать, что она точно не складывается из деятельности узких групп людей. Тот же *Google* родился на базе уже существовавших технологий. Его создатели — Сергей Брин и Ларри Пейдж — предложили именно социальную направленность их применения, но сами технологии уже были разработаны.

У каждой из вещей, которые я привел в пример, был определенный жизненный цикл. Если мы говорим о том, что начинаем сейчас активно и практически заниматься вопросами аддитивных технологий, то, скорее всего, потребуются как минимум пять, семь, десять лет, чтобы на рынке появились доступные принтеры не из пластика, которые сегодня можно покупать, а более серьезные машины. Се-

### Задача на будущее

— **Недавно знаменитый кардиолог Р.С. Акчурин сказал, что сейчас ученые думают над тем, как с помощью аддитивных технологий выращивать человеческие органы.**

— Сразу скажу: я знаю, что это можно сделать. Мы занимаемся ядерной медициной, поэтому у нас есть достаточно хорошие контакты с медиками, биологами, биохимиками. Они уже умеют выращивать молекулы, а из этих молекул — собирать крупные молекулы и, так скажем, изделия. Это, конечно, начало пути, но оно показывает, что цель достижима.

В какой степени и как — это немного другие технологии. В «Росатоме» мы пока не делали принтер для выращивания биокомпонентов, но принтеры для выращивания изделий из углерода или композитных частей мы уже создаем. Например, наш НИИ «Графит» совместно с МГУ им. М.В. Ломоносова занимаются такими вещами. Так что это уже не фантастика — или почти не фантастика.

— **Сейчас уже продаются недорогие 3D-принтеры. Можно немного пофантазировать и предположить, что в ближайшее время они появятся в любом доме. Как изменится наша жизнь?**

— Если сейчас спросить обычного человека, какие за последние годы произошли необычные научные открытия, люди вспомнят про Интернет и сотовые телефоны. Я впервые столкнулся с Интернетом в 1990 г., а сама система появилась в 1985 г. Но никто из обычных потребителей до конца 1990-х годов об этом ничего не знал.

годняшние аппараты — не очень качественные, тем не менее каждый школьник может вырастить в них пластмассовую лягушку или что-то в этом духе.



Установка вакуумно-дугового нанесения защитных покрытий



## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ ДУБ

Генеральный директор ЗАО «Наука и инновации», доктор технических наук, профессор.

- Окончил с отличием физико-химический факультет Московского государственного института стали и сплавов. Обладает широкими связями в научной среде и на производстве (металлургические и машиностроительные предприятия) в России и СНГ.
- 2000–2005 гг. — заместитель проректора МИСиС — начальник НИЧ.
- С 2005 г. — заведующий кафедрой коррозии и защиты металлов МИСиС.
- С 2005 г. — генеральный директор ГНЦ РФ ОАО НПО «ЦНИИТМАШ».
- С 2013 г. — генеральный директор ЗАО «Наука и инновации».

— Но это всего лишь игрушка. Мы же сейчас говорим об аддитивных технологиях как об ответственных вещах.

— Если вы привели в пример человеческие органы, то понятно, насколько это серьезно. Точный срок проверки применения этого продукта в ответственных областях — тоже серьезный. Например, сегодня цикл исследований применения нового ядерного топлива — восемь-десять лет. Только по истечении такого срока мы можем сказать, что это топливо может быть безопасно применено. Поэтому цена ответственности разная.

Конечно, эта технология войдет в наш обиход, но, думаю, это будет происходить в каждой сфере по-своему. В вопросе обучения это может быть уже скоро, когда мы просто будем смотреть на изделия. В вопросах того же конструирования, когда можно быстро вырастить модель и посмотреть на руках, насколько друг другу подходят шестеренки, это тоже можно будет сделать достаточно оперативно. Но чтобы научиться промышленно и серийно вырабатывать реальные изделия, которые полетят в космос или будут служить 100 лет на энергообъекте, мы все-таки потратим ощутимое время.

— Если предположить, что программы, которые у «Росатома» связаны с аддитивными технологиями, завершены успешно, что от этого получают люди? Электроэнергия подешевеет, что-то новое появится на рынке?

— Первое и главное: мы получим возможность быть технологически независимыми. Сегодня увлечение глобализацией сделало Россию

в определенной степени технологически зависимой. Далее, мы, конечно, получим сокращение затрат. В этом и состоит смысл любой новой технологии, в частности аддитивной. Производственная ячейка, связанная с аддитивными технологиями, — это не цех длиной в километр, высотой в 20-этажный дом плюс необходимость его содержать и все остальное. Для них не нужны масса обрабатывающей техники и толпа обслуживающего персонала. Это возможность собрать в одном месте такие модули, которые позволят нам избежать необходимости кооперации, связанной с доставкой изделий за многие-многие километры, рисков неполучения в нужное время определенных компонентов. А это в свою очередь ведет к сокращению издержек.

На первом этапе любая технология связана с затратами, но конечная цель — сокращение издержек. Люди вправе рассчитывать на то, что мы получим технологии, которые сделают очень дорогие вещи дешевле и существенно доступнее.

— Токарям и фрезеровщикам надо искать новую работу?

— Нет, конечно. Думаю, еще достаточно продолжительное время обычные материалы будут иметь то же применение. Не следует забывать, что специалисты, которые работают в обычном материаловедении, в обычных технологиях, тоже не стоят на месте. Мы прекрасно понимаем, что сейчас даже традиционная металлургия — это совсем не металлургия тридцатилетней и даже пятнадцатилетней давности.



**Идея из фильма  
«Пятый элемент»,  
когда из кусочка  
ДНК воссоздают  
и выращивают  
биологическую  
модель, постепенно  
становится  
все более реальной**

**— То есть аддитивные технологии — это не замена металлургии, а новое измерение в ней?**

— Именно новое измерение, новые возможности для конструктора. Мы можем представить в качестве фантазии, что при колонизации космоса не будем забрасывать на Луну или на Марс все, что там нужно. С развитием аддитивных технологий мы имеем возможность отправить туда модули, которые уже на месте изготовят из подручных средств все необходимое.

Если уж обращаться к научной фантастике: мы знаем, что многие, казалось бы, совершенно абсурдные вещи, которые предвидели гении научной фантастики, впоследствии все-таки воплощались в жизнь. Поэтому идея, которая воплощена в фильме «Пятый элемент», когда из кусочка ДНК воссоздают и выращивают биологическую модель, постепенно становится все более реальной. Мы не говорим про разум, но внешняя форма уже вполне может быть достигнута. ■

*Беседовал Валерий Чумаков*



A composite image showing a space station on the left and a satellite on the right, both orbiting Earth. The Earth's surface is visible with blue oceans and white clouds. A bright light source, likely the sun, is visible in the upper left, creating a lens flare effect across the scene.

## Дальность полета обычного самолета

ограничена эффективностью  
работы двигателя и запасом  
топлива

# Атомоплан, атомолет, атомосат...

Самолет с ядерным двигателем мог бы  
барражировать в воздухе месяцами,  
а дальность его полета исчислялась бы  
десятками, а то и сотнями оборотов  
вокруг планеты, но использование  
ядерной энергии на высотах, близких  
к Земле, — это нерациональное,  
опасное направление

# Н

аучный консультант генерального директора концерна «Росэнергоатом», академик РАН, в 1990-е гг. — вице-президент Российского научного центра «Курчатовский институт», профессор, лауреат Ленинской и Государственной премий **Николай Николаевич Пономарев-Степной** стоял у самых истоков ядерной энергетики для авиации, ракет и космоса.

— **Николай Николаевич, еще в 60-е гг. прошлого века вопрос создания ядерных космических систем активно разрабатывался, причем не только в СССР, но и в США. Затем он был практически закрыт. С чем это было связано?**

— Работы по использованию атомной энергии в космосе фактически стартовали в начале 1950-х гг. На заре развития и освоения атомной энергии первоочередной была задача создания атомной бомбы. Но создать атомную бомбу и держать ее у себя в стране нет смысла. Нужно было решать вопрос доставки ее на большое расстояние.

## Атомоплан

— Основную ставку сделали на атомный подводный флот. Но рассчитывать только на него было опротивело. Поэтому началась разработка ядерных установок для авиации. Дальность полета обычного самолета ограничена эффективностью работы двигателя и запасом топлива. Самолет с ядерным двигателем мог бы барражировать в воздухе месяцами, а дальность его полета исчислялась бы десятками, а то и сотнями оборотов вокруг планеты. Будучи еще студентом, я начал одну из таких разработок.

— **Вы работали над проектом ядерного бомбардировщика?**

— Ядерный бомбардировщик — это просто продолжение линии обычных бомбардировщиков, которыми занимались и А.Н. Туполев, и В.М. Мясищев. Разрабатывались новые самолеты дальней авиации, которые должны были бы обеспечить доставку заряда в любую точку земного шара. Помимо этого рассматривались и беспилотные варианты. В атомном исполнении их называли «летающая атомная ракета».

— **Движение предполагалось за счет реактивной струи? Или это была энергетическая ядерная бортовая установка, питавшая электродвигатели?**

— Ядерная энергия может обеспечить практически любую температуру. Энергия реализуется в виде кинетической энергии осколков деления атомного ядра. А их скорость — колоссальная. Скорость — это температура, поэтому ограничений

в температуре практически нет. Рассматривались даже экзотические варианты с непосредственным использованием энергии этих осколков.

— **С управляемым ядерным взрывом в качестве источника движущей силы?**

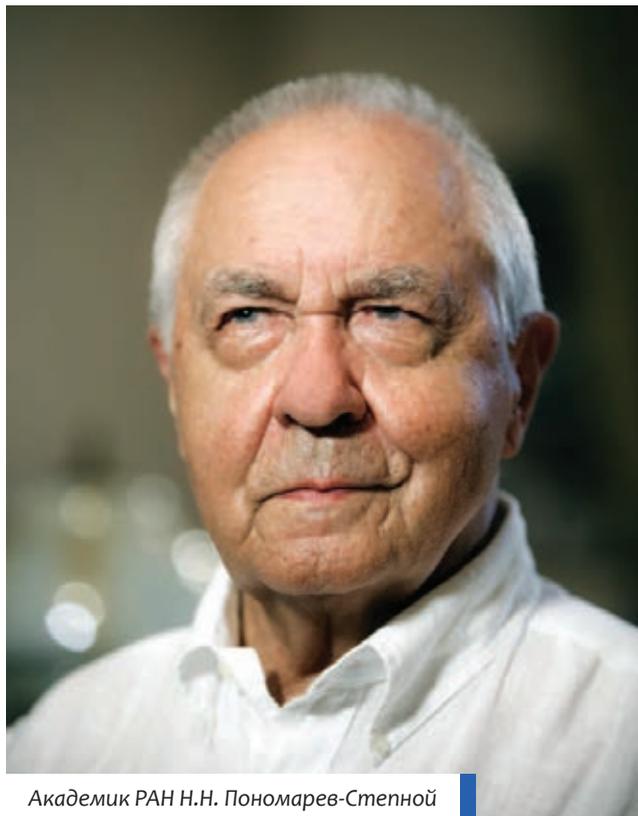
— Такой вариант рассматривался, но развития не получил. Однако за счет созданной в реакторе высокой температуры в воздушно-реактивном двигателе можно было нагреть воздух и получить значительную тягу. Прямоточный ядерный воздушно-реактивный двигатель. В самом начале 1950-х гг. я как раз и занимался такими — для беспилотных аппаратов.

— **Понятно, пилотам летать верхом на ядерной реакции будет опасно.**

— Не в этом дело, пилотируемые варианты атомных самолетов на воздушно-реактивных двигателях тоже рассматривались. Делалось это не только у нас, но и за рубежом, в США. Сейчас многие документы рассекречены, и когда я читаю о том, как они в этом направлении двигались, вижу, что в вопросе создания прямоточного двигателя для беспилотного самолета мы оказались впереди.

— **То есть в создании атомной бомбы в 1940-е гг. они нас опередили, а в атомном двигателе в 1950-е гг. — уже мы их?**

**Ядерная энергия может обеспечить практически любую температуру. Энергия реализуется в виде кинетической энергии осколков деления атомного ядра**



Академик РАН Н.Н. Пономарев-Стенной

— В работах по атомной энергии в СССР мы держались по сравнению с американцами и англичанами из-за Великой Отечественной войны. Интервал в три-четыре года отслеживается во всех исторических точках. Пуск первого реактора в США — 1942 г., у нас — 1946 г. Ядерная бомба: Америка — 1945 г., СССР — 1949 г. Первая атомная подводная лодка — 1955 и 1958 гг. соответственно. А вот по ядерному беспилотнику мы их опережали. У них и разработки были, и испытательные стенды построены, и сами реакторы такого типа были собраны. Но потом эти работы были приостановлены.

**— Почему? Признали работы бесперспективными или авария случилась?**

— Нет, решение возникло на чисто политическом уровне: работы по самолетам прекратить и основной упор сделать на ракеты. Так и пошли две основные линии средств доставки: ракеты и подводный флот.

Мы сделали реактор, который мог нагревать воздух до температуры 1500° К и даже больше. Это превышало возможности обычных воздушно-реактивных двигателей. Самолеты с такими двигателями могли бы развивать скорость более 3 М (Мах), т.е. больше трех скоростей звука.

**— Больше 4 тыс. км/ч? Впечатляет. Жаль, что не дали довести проект до конца.**

— Ая с этим решением, как ни странно, согласен. Ядерная энергия помимо всех своих достоинств обладает существенным недостатком — это

радиационная опасность продуктов деления. Для изучения проблем радиационной безопасности полетов атомных самолетов в СССР был создан и испытан самолет с ядерным реактором на борту, на котором мне удалось полетать. Эти исследования помогли нам в решении сложнейших задач оптимизации радиационной защиты таких самолетов. Но нет самолетов, на которых не случалось аварий из-за технических неисправностей. Любое падение самолета — трагедия, но падение самолета с ядерным реактором — уже настоящая катастрофа. Поэтому линия использования ядерной энергии на высотах, близких к Земле, — это нерациональное, опасное направление. Даже думать о нем не стоит.

### Атомолет

**— Ближе к земле — согласен. Но можно же и не близко.**

— Совершенно верно. Как я сказал, в стране было принято решение сосредоточиться на ракетных двигателях. И сразу же возник вопрос, нельзя ли в ракетных двигателях использовать ядерный реактор. Основные работы по этому направлению велись в Исследовательском центре им. М.В. Келдыша, тогда он назывался, насколько я вспоминаю вывеску на фронтоне, Институтом сельскохозяйственного машиностроения. Это там были разработаны знаменитые катюши. Наш Курчатовский институт тогда очень плотно контактировал с ними по атомному направлению.

Для ракет всегда ищут подходящее вещество, «рабочее тело», которое можно нагреть до очень высоких температур. Чем выше нагрев и чем меньше атомный вес, тем больше так называемая удельная тяга двигателя. На обычном химическом топливе удельная тяга — около 300 с. Сделать больше практически невозможно, потому что для сжигания топлива требуется кислород, который имеет большой атомный вес. Поэтому удельная тяга при химическом топливе ограничена, получить высокие ее значения очень сложно.

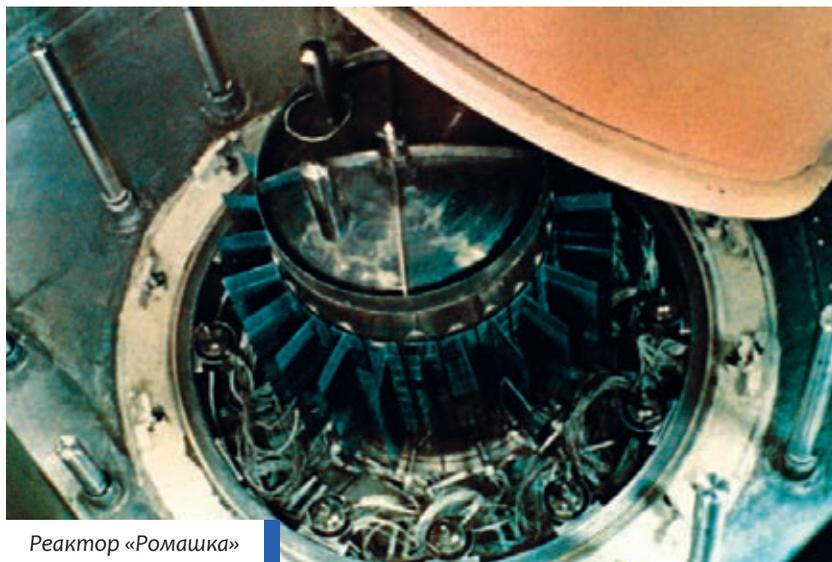
По Циолковскому, от удельной тяги зависит масса груза, который можно вывести на орбиту. Чтобы получить высокую тягу, надо отказаться от кислорода и оставить в качестве «рабочего тела» водород — самый легкий элемент. Тогда тяга будет зависеть только от температуры, до которой вы этот водород нагреете. В случае с ядерным реактором его тепловыделяющие элементы могут как максимум выдержать несколько более 3100° К. Следовательно, и водород вы максимально можете разогреть до тех же температур. При таких условиях тяга вырастает уже до 950 с, т.е. становится в три раза больше, — а значит и масса, которую вы можете вывести, тоже увеличится в разы.

Объединившись, ракетчики и атомщики занялись разработкой такого ракетного ядерного двигателя, где тепловыделяющие элементы могут

нагреть рабочее тело — водород, до этих 3100° К. И мы сделали такой реактор. Испытали его на специально построенной на Семипалатинском полигоне площадке. Сначала там был установлен импульсный, затем исследовательский реактор, на которых мы испытывали отдельные элементы для достижения предельных параметров. А потом и двигатель целиком испытали.

— **Тут мы тоже опередили американцев?**

— У них результаты оказались поскромнее. Они достигали 2500° К, а это меньшая удельная тяга и т.д. Но к этому времени уже были созданы ракеты на обычном топливе, которые хорошо справлялись с поставленной задачей. И необходимость в ядерной ракете опять отошла на второй план. К тому же нерешенным остался вопрос безопасности в случае аварии на старте.



Реактор «Ромашка»

— **И когда это направление прикрыли?**

— Это направление окончательно не закрыто. Если стартовать не с Земли, а с опорной орбиты, с которой аппарат не может быстро упасть, то такого типа двигатель может использоваться для различных космических миссий. Эту работу мы тоже выполняли, она лежит в копилке российских науки и технологий. Такие результаты в Америке не были достигнуты.

Что же до вопроса когда, то и двигатели, и реакторы у нас были испытаны в 1970-е гг.

— **Но в космос они не полетели?**

— Эти реакторы — нет. Полетели другие.

## Атомосат

— К этому времени уже были освоены и вывод аппаратов на орбиту, и даже транспланетные автоматические экспедиции. И довольно актуальным был вопрос, чем питать эти космические аппараты.

— **Так ведь с самого начала солнечной энергией питали.**

— Это самое очевидное и правильное решение. Но только в случае ближнего космоса и относительно небольших мощностей. Если брать дальние экспедиции, то солнечной энергии может уже не хватать. Либо придется наращивать площадь солнечных элементов. Но аппарат с большими панелями становится плохо управляемым. Поэтому логичный выход — использовать ядерную энергию. Если говорить о небольших потребностях в энергии, тут можно использовать радиоактивные изотопы. Это направление, которое было опробовано, проверено, реализовано и активно используется. Достаточно вспомнить недавнюю экспедицию к Плутону, которая стартовала около десяти лет назад.

— **Так называемая атомная батарейка?**

— Не совсем, такая система называется «радиоактивные источники энергии». Под «атомной батарейкой» понимается немного другой вариант использования атомной энергии.

Радиоактивные источники для космических аппаратов действительно нужны, над ними идет работа. СССР и Россия оказались уникальным поставщиком радиоактивного плутония-238, который применяется в них как энергетический материал. Этот плутоний не оружейный, но может получаться в тех же промышленных реакторах. Такие источники используются американцами. В том аппарате, который летит за пределы Солнечной системы, работает плутоний-238 российского производства.

— **Но это все-таки ограниченная мощность. Что делать, если требуются не ватты, а хотя бы киловатты?**

— Здесь есть два варианта. Один — традиционный: берешь ядерный реактор, нагреваешь в нем какое-то «рабочее тело», дальше используешь обычное машинное преобразование — турбину. Но эта система связана с большим числом движущихся деталей. Значит, велика вероятность поломок, износа и т.д. Но есть другой вариант, когда в системе преобразования вообще исключены движущиеся элементы, — прямое преобразование энергии.

Одна из первых установок такого типа создана в 1964 г. в Курчатовском институте. Это реактор-преобразователь «Ромашка», в котором тепловыделяющие элементы нагреваются до температуры около 2000° С. Дальше это тепло попадает в преобразователь энергии. Если говорить на бытовом уровне, это обычная термопара, но выполненная из полупроводников, с более высокой эффективностью.

К сожалению, коэффициент полезного действия в таких преобразователях невелик — около 5%.

Неиспользованное тепло в виде излучения сбрасывается в окружающее пространство. Это особенность космических установок.

Первую «Ромашку» мы испытали перед Женевской конференцией в августе 1964 г. Я по этому реактору делал доклад. Со мной рядом сидел американец, который выступал по подобным американским разработкам. Когда я читал доклад, он схватился за карман, достал таблетку и положил под язык. Оказалось, когда я сказал: «Мы запустили этот реактор 24 августа», переводчик передал «запустили» как *launched* и все поняли мои слова как «запустили в космос». Вот человеку, который занимался той же проблемой, и стало плохо, когда он представил, насколько мы их обогнали.

Такие реакторы с прямым преобразованием энергии для космоса весьма перспективны.

**— Но вы сами сказали про низкий КПД. Неужели за прошедшие столетия не нашлось способов его повысить?**

— Можно использовать прямое преобразование другого типа — термоэлектронную эмиссию. Преобразователи на этом принципе стали следующим направлением наших поисков.

Сначала были созданы ядерные реакторы с термоэлектрическими преобразователями, они использовались в оборонных целях. Было запущено около 30 военных спутников — компактных, незаметных (благо солнечных батарей нет) и в то же время оборудованных мощной электроникой.

Термоэмиссионные установки в СССР разрабатывались в двух вариантах. Оба достигли хорошего уровня, а ресурс их работы со временем был доведен до пяти лет.

**— Ядерный реактор требуется охлаждать. А космос — это огромный и очень эффективный термос.**

— Сброс тепла — одно из уязвимых мест таких систем. Имея установку с электрической мощностью 1 МВт, вы должны сбросить в космос около 3 МВт тепловых. Проблема сброса тепла — колоссальная, потому что холодильник-излучатель вырастает до значительных размеров. Недавно возникла идея, которая сейчас прорабатывается в центре им. М.В. Келдыша: капельный холодильник-излучатель. Охлаждающая жидкость циркулирует, забирая тепло от установки, а дальше распыляется в космос, но так, чтобы потом уже охладившиеся капельки, все до одной, можно было поймать. Охлаждаются они существенно эффективнее, чем жидкость, которая течет в трубах. Уже проводятся эксперименты в космосе. Очень интересный проект.

**— Вы сказали: «одно из уязвимых мест». Какое второе?**

— Опять безопасность. Такую установку нельзя выводить уже запущенной: в случае аварии на старте можно получить эффект «грязной

## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ ПОНОМАРЕВ-СТЕПНОЙ

Доктор технических наук, профессор,  
академик РАН

■ В 1952 г. окончил Московский механический институт, в том же году начал работать в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (в то время «Лаборатория измерительных приборов АН СССР»).

■ 1992–2010 гг. — вице-президент НИЦ «Курчатовский институт». С 2006 г. — научный руководитель ВНИИНМ им. А.А. Бочвара. С 2007 г. — научный руководитель по спецтематике ФГУП «Центр Келдыша». С 2010 г. — главный специалист по атомной энергетике ИБРАЭ РАН, научный консультант генерального директора концерна «Росэнергоатом».

■ Лауреат Ленинской премии (1985), лауреат Государственной премии СССР (1980). Награжден орденами Трудового Красного Знамени (1966, 1976), «За заслуги перед Отечеством» IV степени (1998), медалями СССР и России.

бомбы». Орбиты, на которых используется установка, должны располагаться так далеко от Земли, чтобы она не упала в течение тысячи лет.

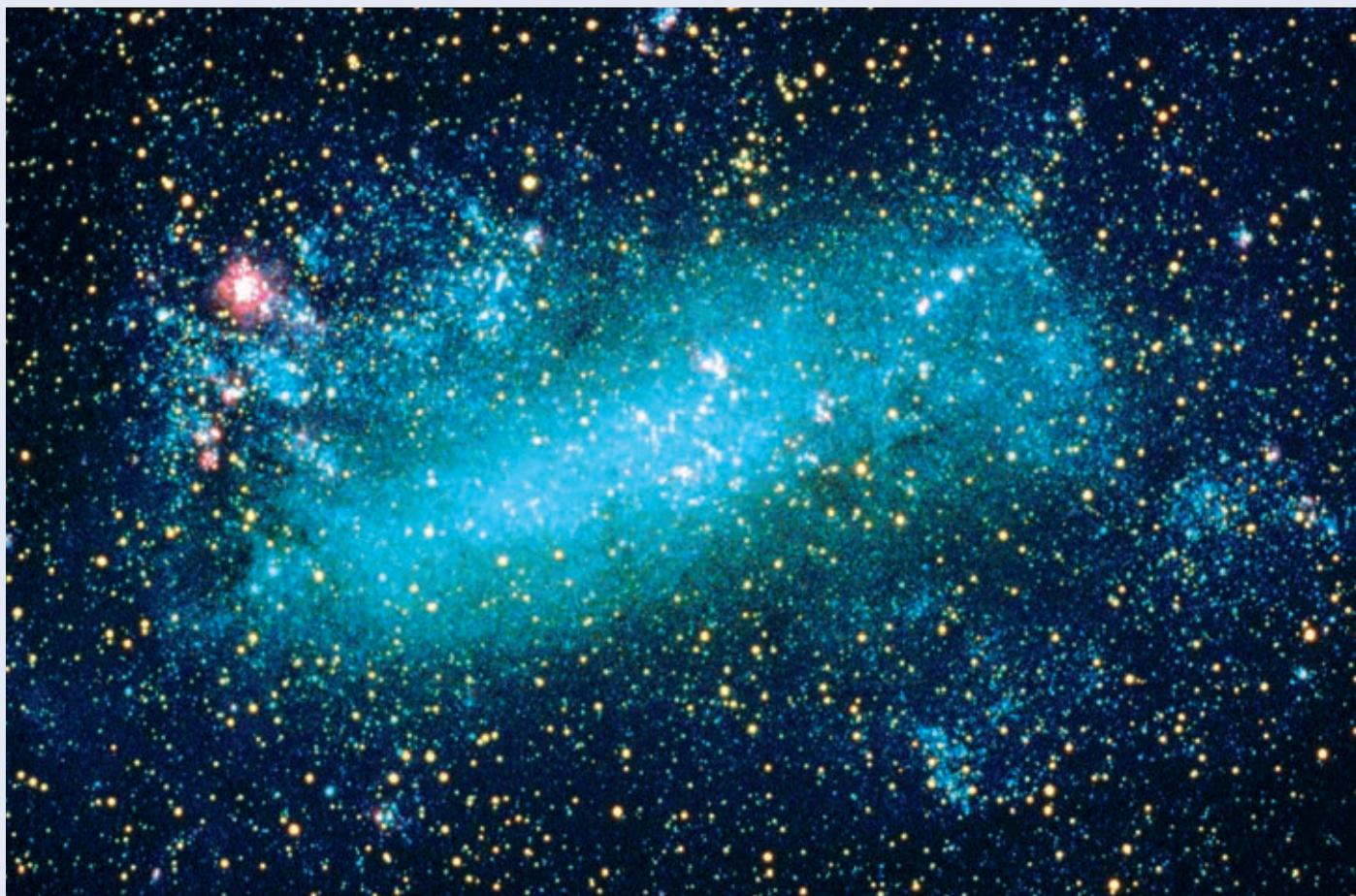
**— Это называется «орбита захоронения»?**

— Да, для военных спутников с ЯЭУ ее высота — около 1 тыс. км. Кроме того, мы должны уже в космосе, на орбите запустить реактор, а это совсем не так просто, как кажется. Надо гарантировать, что отказа не произойдет, а для этого надо на Земле провести всю отработку с более высокой степенью гарантии, чем на атомных станциях. Потому что там ничего починить уже не получится. Отлетел болтик или гайка — все, установка становится бесполезной. А это колоссальные средства.

Но я надеюсь, что человечество, возможно, притормозит, однако не остановится в деле создания таких установок большой мощности, которые нужны и для дальних космических экспедиций, и для близких к нашей планете задач.

Разработка высокотемпературных реакторов для самолетов, ракет и космоса и достигнутые при этом технологические решения оказались настолько впечатляющими, что зародилось новое технологическое направление наземной ядерной энергетики — использование ядерной энергии не только для получения электроэнергии, но и в промышленных технологических процессах и в конечном счете для получения водорода из воды. Но это другая глава книги и жизни. ■

Беседовал Валерий Чумаков



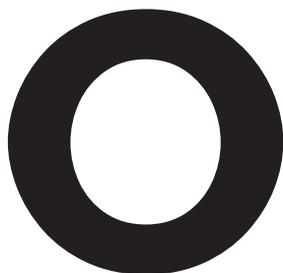
Воплощая  
**мечту**



## «Мечты фантастов о ядерных звездолетах, прокладывающих дорогу к другим планетам и звездам, станут для нас все более реальными».

Директор НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала  
член-корреспондент РАН, профессор

**Юрий Григорьевич  
ДРАГУНОВ**



Об истории и перспективах космической ядерной энергетики рассказывает директор — генеральный конструктор Научно-исследовательского и конструкторского института энерготехники им. Н.А. Доллежала (НИКИЭТ) член-корреспондент РАН, профессор **Юрий Григорьевич Драгунов**

Космическая ядерная энергетика началась с разработки ядерного ракетного двигателя (ЯРД). Первые расчетно-теоретические исследования такого двигателя для космических ракет были произведены в 1954 г. учеными лаборатории «В» (в настоящее время — АО «Физико-энергетический институт») Игорем Бондаренко, Виктором Пупко и др. Вскоре к этим работам подключилась по инициативе директора НИИ-1 Минавиапрома (в настоящее время — ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша») академика Мстислава Келдыша группа сотрудников института во главе с Валентином Иевлевым. В 1957 г. им был выдвинут принцип, позволивший уменьшить объем необходимых реакторных испытаний, что в свою очередь послужило важным аргументом в выборе гетерогенной схемы реактора. Ориентация на такой реактор и поэлементную отработку его узлов определила фундаментальное различие программ создания ядерного двигателя в СССР и США. И это различие, как было позднее признано в том числе и американскими специалистами, оказалось в пользу советской программы.

### **Движение**

Уже в 1956 г. В НИИ-1 была сформулирована программа первых экспериментальных работ. А спустя два года на Семипалатинском ядерном полигоне началось строительство экспериментальной базы для отработки ЯРД. Первым объектом строительства стал стенд с «Реактором взрывного действия» (РВД). Сегодня он носит название «Импульсный графитовый реактор» (ИГР). Реактор обеспечивал проведение петлевых испытаний тепловыделяющих сборок (ТВС) ЯРД. С разработки этого проекта началось приобретение нашего НИКИЭТ к космической проблематике, связанной с ЯРД.

ИГР представляет собой гомогенный неохлаждаемый уран-графитовый реактор, работающий на принципе аккумуляции всей выделяющейся в процессе одного цикла тепловой энергии в материале активной зоны. В центральном канале этого реактора в 1962–1964 гг. были проведены первые три серии кратковременных испытаний макетных ТВС. Была экспериментально доказана возможность нагрева водорода — рабочего тела ЯРД

до температуры порядка 3000 К, что обеспечивает получение импульса тяги, вдвое превосходящего удельный импульс тяги самых эффективных ракетных двигателей на топливе водород-кислород.

В 1964 г. на Семипалатинском полигоне началось строительство стендового комплекса «Байкал» для испытаний ЯРД и его элементов. Первую позицию на нем занял разработанный в НИКИЭТ исследовательский реактор ИВГ-1 для испытаний полномасштабных ТВС. В период с 1975 по 1988 г. было проведено 30 пусков реактора, в которых испытали четыре опытные активные зоны и более 200 газоохлаждаемых ТВС для ядерных ракетных двигателей. Испытания подтвердили правиль-



Импульсный графитовый реактор (ИГР)

ность выбранной в отечественной программе концепции построения ЯРД, а значительная часть достигнутых в ходе испытаний результатов стала уникальной в мировой практике.

Успешное проведение испытаний ТВС в реакторе ИВГ позволило приступить к автономным испытаниям реактора ЯРД. Стендовая отработка реактора ЯРД тягой 36 кН проводилась в составе специально спроектированного аппарата 11Б91-ИР-100 (ИРГИТ) на втором «А» рабочем месте испытательного комплекса «Байкал». В течение 1977–1978 гг. были проведены физический и энергетический пуски реактора и два огневых испытания. В конце 1970-х — начале 1980-х гг. на стендовом комплексе были проведены еще две серии испытаний — второго и третьего аппаратов 11Б91-ИР-100.

Начиная с 1983 г. там же было проведено несколько серий длительных испытаний реактора ЯРД на пониженной мощности. Они подтвердили

принципиальную возможность использования реактора ЯРД в качестве источника тепловой энергии длительного пользования с реализацией схемы охлаждения активной зоны реактора без потока хладагента через ТВС. Этим были заложены основы для разработки в дальнейшем ядерных энергоустановок.

Не менее активно велась разработка ЯРД в США. Национальная программа по ядерным ракетам ROVER/NERVA охватывала период с 1959 по 1972 г. В Соединенных Штатах в этой области (реакторы *Phoebus*, *Pewee*, *NFI*) было испытано около 40 установок с реакторами ЯРД. Более 20 подверглись полномасштабным испытаниям, в том числе были

отработаны двигатели в целом, включая подачу жидкого водорода. За основу конструкции был принят гомогенный реактор с активной зоной из графита и осевым течением водорода. Программа была признана одной из наиболее успешных технических разработок самой передовой технологии США.

Однако, несмотря на значительно меньшие затраты на реализацию программы ЯРД, наша страна значительно опередила США по таким параметрам, как температура водорода на выходе из реактора (т.е. по величине удельного импульса), плотность энерговыделения в активной зоне, нарабатанный ресурс на максимальных параметрах и т.д.

Главными итогами советских работ по реализации программы создания ЯРД стали:

- 1) отработанная технология производства;
- 2) проведение ресурсных испытаний ТВЭЛ и ТВС: активной зоны реактора, замедлителя, отражателя, радиационной защиты, исполнительных и рабочих органов регулирования реактора, оборудования системы подачи и хранения водорода, соплового блока и др.;
- 3) проведение радиационных исследований конструктивных материалов;
- 4) создание комплексной экспериментальной базы по отработке основных узлов реактора ЯРД;
- 5) комплекс исследовательских работ, обеспечивших создание реактора ИРГИТ.

В реализации советской программы ЯРД приняли участие большое количество выдающихся научных институтов и конструкторских бюро Советского Союза: Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, КБХА, НПО «Энергомаш», НИКИЭТ, ФЭИ, «Луч», Курчатовский институт и многие другие.

## Сила

Работы по космическим ядерным энергетическим установкам (ЯЭУ) с прямым преобразованием энергии были начаты в нашей стране несколько позднее, чем работы по ЯРД, однако в отличие от ЯРД разработки ЯЭУ были доведены до летных испытаний и штатной эксплуатации в составе космических аппаратов (КА). Они начались с разработки и создания в 1961–1964 гг. экспериментального реактора-преобразователя (РП) «Ромашка» с электрической мощностью 0,5 кВт, проработавшего в ИАЭ им. И.В. Курчатова в непрерывном режиме около двух лет.

Первая энергоустановка на базе ядерного реактора была выведена в космос в апреле 1965 г. Эта была первая и единственная американская ЯЭУ SNAP-10A с термоэлектрическим преобразователем электрической мощностью 0,5 кВт.

Первой отечественной ядерной энергоустановкой, эксплуатировавшейся в космосе, стала ЯЭУ «Бук» с термоэлектрическим преобразованием энергии. Работы по ее созданию были развернуты в ФЭИ, КБ М.М. Бондарюка, СФТИ, Институте источников тока в начале 1960-х гг. Впоследствии они были продолжены в НПО «Красная Звезда».

За весь период эксплуатации с 1970 по 1988 г. в составе космических аппаратов морского радиолокационного наблюдения на низкие околоземные орбиты был выведен 31 КА с ЯЭУ «Бук». Максимальная электрическая мощность установки составляла около 3 кВт, в процессе летной эксплуатации ее ресурс был доведен до 4400 часов, что приблизительно равно полугоду.

Параллельно с испытанием первых термоэлектрических ядерных энергетических установок «Ромашка» и «Бук» в СССР были развернуты работы по созданию космических ядерных установок на основе термоэмиссионных преобразователей энергии, встроенных в активную зону реактора.

В кооперации НПО «Красная Звезда» и ФЭИ разрабатывался вариант термоэмиссионной ЯЭУ с многоэлементными электрогенерирующими каналами (ЭГК) (ЯЭУ «Топаз»), а в кооперации ЦКБМ, Курчатовского института, НПО «Луч», ПНИТИ и СФТИ — вариант термоэмиссионной ЯЭУ с одноэлементными ЭГК (ЯЭУ «Енисей»).

В 1970–1973 гг. были созданы и впервые в мире прошли энергетические испытания восемь прототипов термоэмиссионных ЯЭУ с реактором-преобразователем на основе многоэлементных ЭГК. Два опытных образца ЯЭУ «Топаз» в 1987 и 1988 гг. были испытаны в космосе в составе экспериментального космического аппарата «Плазма-А» («Космос-1818» и «Космос-1867»), подтвердив ресурс в процессе первого испытания 142 суток, а в процессе второго — около 342 суток.

Разработка установки «Енисей» (известной за рубежом как «Топаз-2») завершилась полным

циклом наземной отработки, включая шесть ядерных энергетических испытаний с подтверждением ресурса около полутора лет, с прогнозированием ресурса по результатам разделки и изучения критических элементов до трех и более лет. Для проведения летных испытаний были изготовлены два штатных изделия «Енисей» и несколько опытных образцов для отработки стыковки с КА. Летные испытания установки в связи с сокращением финансирования не проводились, а изготовленные опытные образцы (с электротепловым нагревом) были задействованы в программе совместных работ с США (в международной программе «Топаз»).

Сегодня энергоснабжение абсолютного большинства КА осуществляется за счет солнечной энергии (исключение составляют несколько КА с радиоизотопными энергоустановками). Мощность солнечных энергоустановок современных КА достигает 20 кВт при сроке активного существования до 20 лет.

## Будущее космонавтики неразрывно связано с ростом энергообеспечения космических аппаратов и расширением их функциональных возможностей

Будущее космонавтики неразрывно связано с ростом энергообеспечения космических аппаратов и расширением их функциональных возможностей. Усложнение решаемых космическими средствами задач в околоземном и дальнем космосе способствует возвращению ядерной энергетики в космос на новом технологическом уровне, позволяющем создать ядерные энергодвигательные установки (ЯЭДУ) высокой мощности (1000 кВт эл. и более) с длительным ресурсом работ. Космические ядерные энергоустановки значительно превосходят солнечные по ряду определяющих параметров: удельной массе при мощности, превышающей 100 кВт эл., габаритам в транспортном и развернутом положении и др. Важным достоинством ЯЭУ стала практическая независимость мощности от расстояния до Солнца, а также возможность энергообеспечения КА на теневых участках орбиты.

Использование космических ядерных энергоустановок позволяет приступить к решению следующих амбициозных задач:

- создание глобальных систем связи, дистанционного зондирования Земли, экологического мониторинга, предупреждения о стихийных бедствиях и т.д.;
- детальные исследования планет и их спутников;
- промышленное производство в космосе;
- очистка околоземного космического пространства от космического мусора;
- борьба с астероидной опасностью;
- создание автоматизированных напланетных баз;
- отработка методов борьбы с опасными космическими объектами;
- полеты на Луну и Марс.

### Движущая сила

В октябре 2009 г. Комиссия при Президенте Российской Федерации по модернизации и технологическому развитию экономики России утвердила проект «Создание транспортно-энергетическо-

предприятий и организаций. Создана широкая научно-производственная кооперация, включающая в себя ведущие научные и производственные организации, в том числе ядерные центры, институты РАН, ведущие российские вузы.

Основной элемент ТЭМ — ядерный реактор, предназначенный для выработки тепловой энергии, которая затем преобразовывается в электрическую и используется в различных системах потребления космического объекта. Ранее в мире неоднократно делались попытки создания реакторов для подобных целей. Для проекта ТЭМ на основе прошлого опыта и проведенных предварительных исследований был сделан выбор в пользу высокотемпературного газоохлаждаемого реактора на быстрых нейтронах.

Принципиальные особенности реактора состоят в применении в активной зоне тугоплавких материалов, минимальных весогабаритных характеристик реактора, работе без перегрузки топлива в течение всей кампании, обеспечении ядерной и радиационной безопасности РУ на всех этапах ее существования, включая стартовые режимы запуска.



Ядерная энергетическая установка «Топаз-150»

го модуля на основе ядерной энергодвигательной установки мегаваттного класса». Главная цель — обеспечение лидирующих позиций нашей страны в разработке высокоэффективных энергетических комплексов космического назначения, существенно повышающее их функциональные возможности. Проект ориентирован на создание качественно новых космических средств высокой энерговооруженности, обеспечивающих долгосрочные государственные интересы в области изучения, освоения и использования космического пространства после 2020 г. и далее. Основные участники проекта — предприятия «Роскосмоса», ГК «Росатом» и НИЦ «Курчатовский институт».

«Росатом» стал государственным заказчиком работ по реализации проекта в части создания реакторной установки (РУ), АО «НИКИЭТ» определен главным конструктором реакторной установки. Кроме НИКИЭТ в работах по созданию реакторной установки для ТЭМ участвуют около 30 российских

Ключевой вопрос создания реакторной установки для ее использования в космосе — обеспечение ядерной и радиационной безопасности на всех этапах жизненного цикла, включая аварийные ситуации. Концепции обеспечения безопасного использования космических ЯЭДУ базируются на документе «Принципы, касающиеся использования ядерных источников энергии в космическом пространстве», одобренным Генеральной Ассамблеей ООН в резолюции 47/68 от 14.12.1992. Ее основные требования:

- сохранение реактора ЯЭДУ в подкритическом состоянии (без протекания цепной реакции) до выхода космического аппарата с ЯЭДУ на радиационно-безопасную орбиту;
- запуск реактора только на радиационно безопасной орбите;
- остановка реактора после выполнения аппаратом заданной программы полета или при возникновении аварийной ситуации;

- по окончании кампании — транспортирование ТЭМ на удаленную орбиту и последующая утилизация, обеспечивающая безопасность населения Земли.

Все эти требования учтены при разработке конструкции реакторной установки газовой космической (РУГК).

В рамках проекта создания РУГК разработаны и введены в действие нормативные документы, регламентирующие обеспечение ядерной и радиационной безопасности космических ядерных энергетических установок. К настоящему времени выполнены расчетные работы по обоснованию ядерной и радиационной безопасности реакторной установки при нештатных ситуациях. Проводятся испытания, имитирующие аварийные ситуации столкновения ТЭМ с поверхностью Земли при падении на старте и схода с орбиты для верификации расчетных кодов по обоснованию ядерной и радиационной безопасности реакторной установки.

Проведен огромный объем работ по созданию РУ:

- выполнены расчетные и опытно-конструкторские работы по РУ, выбран оптимальный вариант компоновки и конструкции;

- разработана конструкторская документация по составным частям и макетам РУ; отработаны технологии получения полуфабрикатов и изготовления деталей и узлов, изготовлены модели, макеты составных частей РУ;

- проведены их вне реакторные и реакторные испытания, осуществлена подготовка производства для опытно-промышленного изготовления ТВЭЛ.

Результаты испытаний подтвердили работоспособность конструкционных материалов, элементов конструкции РУ, органов регулирования системы управления и защиты (РО КСУЗ) при рабочих параметрах эксплуатации.

В ходе реализации проекта РУ создаются новые технологии, полезные модели и изобретения, которые могут эффективно использоваться в других отраслях народного хозяйства.

Создана материальная и техническая база для изготовления комплектующих активной зоны и составных частей реакторной установки. На сегодня определены поставщики и производители составных частей реакторной установки. Проект ориентирован исключительно на российского производителя.

Результаты технического аудита по реализации проекта, проведенного предприятиями «Роскосмоса» и «Росатома», свидетельствуют о его принципиальной технической реализуемости. В акте отмечается, что «на предприятиях госкорпорации “Росатом” выполнены опытно-конструкторские работы по разработке реакторной установки, результаты которых показывают реальную достижимость требований технического задания

## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### ЮРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ ДРАГУНОВ

**Доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН.**

- Родился в деревне Ново-Соловьево Можайского района Московской области.

- В 1966 г. окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова.

- Работал в ОКБ «Гидропресс» (Подольск) в должности конструктора, начальника конструкторского отдела, заместителя главного конструктора, главного конструктора — начальника отделения.

- В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию, в 2000 г. — докторскую диссертацию.

- Член-корреспондент РАН с 2006 г., член отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН (секция энергетики), с 2008 г. — профессор по специальности «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации».

- В 1998-2007 гг. — директор — генеральный конструктор Федерального государственного унитарного предприятия «Ордена Трудового Красного Знамени и ордена Труда ЧССР ОКБ “Гидропресс”».

- С 1995 по 2005 г. — член международной рабочей группы МАГАТЭ по управлению ресурсом АЭС. В 2007-2008 гг. — советник директора ОАО «Атомэнергопром». С октября 2008 г. — заместитель генерального директора ОАО ОМЗ, а с декабря 2008 г. — первый заместитель генерального директора ОАО ОМЗ. С 1 июля 2009 г. — генеральный директор ОАО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежаля».

- Заведующий кафедрой Э-7 «Ядерные реакторы и установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

- Лауреат премии Совета Министров СССР (1991), заслуженный конструктор РФ (1995).

- Награжден орденом Почета (2003) и другими знаками отличия. Почетный гражданин Московской области.

(ТЗ). При этом подтверждена готовность реакторной установки к проведению наземных испытаний с заданными в ТЗ параметрами.

А это значит, что мечты фантастов о ядерных звездолетах, прокладывающих дорогу к другим планетам и звездам, становятся для нас все более реальными. ■

*Подготовил Валерий Чумаков*



# Новые материалы

для новой  
эпохи

# Конструкционные материалы

## для атомных электростанций —

это функциональные материалы (т.е. со свойствами, отвечающими определенным условиям эксплуатации) самого различного назначения, которые специально разрабатываются и изготавливаются для активных зон ядерных реакторов и обеспечивают целостность и надежность эксплуатации всех элементов.

Существуют специальные функциональные конструкционные материалы для специфических технологий и применения только в атомной отрасли, например по переработке ОЯТ (отработанного ядерного топлива) и РАО (радиоактивных отходов).



Это специальные виды бетонов, радиационно стойких стекол и керамик, материалы контейнеров для перевозки и хранения ядерного топлива и т.д. В этом случае к ним также применим термин «конструкционные материалы для атомной энергетики».

## В современной науке

немало областей, в которых приходится иметь дело с экстремальными условиями — немислимыми давлениями, сверхвысокими и сверхнизкими температурами, радиационным воздействием...

**В** современной науке немало областей, в которых приходится иметь дело с экстремальными условиями — немислимими давлениями, сверхвысокими и сверхнизкими температурами, радиационным воздействием. С развитием технологий разрушительная сила искусственно созданных очагов подобных воздействий нарастает, а это, в свою очередь, требует и постоянного совершенствования различных материалов, обеспечивающих защиту. Пожалуй, самый мощный удар принимают на себя стенки атомных реакторов, и не случайно материаловедение в атомной отрасли стало самостоятельной областью науки. Об особенностях этого направления и о развитии отрасли мы беседуем с заместителем генерального директора Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов (ЦНИИ КМ «Прометей») по научной работе, начальником научно-производственного комплекса «Материалы и вопросы безопасности энергетических установок» **Георгием Павловичем Карзовым.**

**— Георгий Павлович, мы сегодня говорим про конструкционное материаловедение в атомной отрасли, которое, по сути, выделилось в отдельное направление. Как и когда это произошло?**

— Толчком послужила потребность в новых материалах для атомных энергетических установок — первой атомной подводной лодки, ледокола, атомной станции. На первоначальном этапе это были не абсолютно новые материалы, а позаимствованные из других областей, в основном из тепловой энергетики. Люди осознавали, что они столкнутся с новыми требованиями, такими как нейтронное излучение, длительные выдержки, ОЯТ, огромные сроки эксплуатации. Мы понимали это, но знаний для решения таких задач на первоначальных этапах было очень мало. Материалом первых ядерных реакторов для атомных подводных лодок, например, послужила пушечная сталь, разработанная еще в начале прошлого века. И по сей день из нее делают стволы корабельных орудий. Конечно, быстро пришло понимание, что материалы из других областей не подходят. И даже самая прочная сталь, из которой делались орудийные стволы, не подходит для атомного реактора. Началась работа над принципиально новыми материалами. Первая такая сталь, обладающая специфическими необходимыми свойствами, была создана у нас, в ЦНИИ КМ «Прометей».

**— В чем уникальность требований, предъявляемых к материалам в атомной отрасли?**

— Это очень важный вопрос! В сущности, это гвоздь атомного материаловедения. Ни в одной области деятельности человечества не выдвигаются такие специфические требования к материалам, как в атомной промышленности, особенно к материалам для атомного реактора.

Прежде всего — воздействие нейтронов. Они бомбардируют материал, выбивают атомы материала и деформируют кристаллическую решетку, наносят определенные повреждения. Одновременно с этим нейтроны, которые проходят через металлическую стенку реактора, меняют энергетическое состояние этого металла, т.е. возбужденность

**Наша задача — создавать такие материалы, чтобы они сохраняли свои функциональные качества, не подвергаясь разрушению в течение всего срока службы**



Доктор технических наук, профессор Г.П. Карзов

его структуры (это не научный термин, но так будет более понятно) уже соответствует не реальной температуре протекающего процесса, а температуре на  $200^{\circ}\text{C}$  выше. Значит, происходят диффузионные процессы, возникают повреждения в кристаллической решетке, меняется тонкая структура металла. Такого не бывает в других отраслях.

Второе — долгий срок эксплуатации материала. Самолет можно заменить, а атомный реактор быстро поменять нельзя. Сначала были требования срока службы в 30 лет; естественно, 30 лет промелькнули как один год. Сейчас требования к сроку службы реакторов установлены в 60–80 лет, скоро мы придем к столетнему сроку эксплуатации. Наша задача — создавать материалы, обладающие настолько высокой стабильностью свойств, чтобы при этих серьезных воздействиях они сохраняли необходимые функциональные качества, не подвергаясь разрушению в течение всего срока службы.

— **Существуют ли области деятельности человека, где применяются схожие требования к материалам?**

— Существуют отрасли, где требования к материалам очень жесткие. Вот, например, тепловая энергетика. Здесь так же, как и в атомной энергетике, материалы должны быть долговечны, устойчивы к высоким температурам, но нет воздействия нейтронного излучения. Или авиация, особенно если речь идет о моторах: сроки службы намного меньше, но присутствуют серьезнейшие нагрузки и температуры. В судостроении также высочайшие требования к материалам, несмотря на отсутствие высоких температур: корабли не ходят по расплавленному свинцу. Но в судостроении очень серьезные требования к сопротивляемости циклическим воздействиям. Ведь что такое волны? Волны — это циклы нагрузки на материал. И если в атомной отрасли мы говорим о десятках тысяч циклов, в авиастроении о сотнях тысяч, то в судостроении — о миллиардах циклов. Вот возьмем такой пример: есть дефект металла в 5 мм. За 10 тыс. циклов этот дефект вырастет, скажем, на 10 мм. В реакторе я этот дефект, может быть, даже и не замечу — ну что такое дефект в 5 мм? В конце срока службы он станет 6 мм. В самолетостроении дефект будет увеличиваться согласно графику: за каждые 10 тыс. циклов не менее чем 1,0 мм. Я уже не смогу с ним не считаться, он будет вызывать опасения, т.к. через 100 тыс. циклов он достигнет 15,0 мм

и может оказывать влияние на прочность конструкции. А в судостроении, на буровых платформах и в мостостроении из-за громадного количества циклов исходный дефект в 5 мм может в процессе эксплуатации привести к полному разрушению элемента конструкции, следовательно, к катастрофическим последствиям, в связи с чем в этих отраслях техники разрабатываются свои комплексы мер по предотвращению такого явления.

### Кесарю — кесарево

— **В атомной промышленности конструкционные материалы выполняют различные функции: одни задействованы в реакторах, другие — в сопутствующих элементах, третьи — для отработанного топлива. Насколько различаются требования для этих типов материалов?**

— Парадоксально, но факт: требования к материалам, выполняющим различные функции, отличаются ровно настолько, насколько это нужно.



То, что допустимо для материала контейнера под ядерное топливо, совершенно неприемлемо для атомного реактора, потому что в реакторе уровень облучения выше, цикличность больше — другие условия эксплуатации. А если мы возьмем внутрикорпусные устройства в самом реакторе, то воздействие нейтронов на стенку внутрикорпусных элементов на три порядка больше, чем на стенку корпуса реактора.

Диапазон предлагаемых обстоятельств для разных конструкций диктует, соответственно, и наше отношение к материалу, к его созданию, к его свойствам и, что более важно, к анализу его возможного поведения.

Рассмотрим всем известный реактор ВВЭР-1000. В районе его активной зоны есть один из элементов внутрикорпусных конструкций — «выгородка». На нее приходится до 150–180 СНА (число смещений на атом — мера радиационного повреждения, смещение атомов кристаллической

## Чем можем поделиться: приборы и материалы

- Композиционные материалы на основе углерода.
- Стабильные изотопы, широко используемые в промышленности и медицине (бор-11 в микроэлектронике и углерод-14- в медицине).
- Новые материалы на основе радионуклидов (имеют свою специфику разработки, использования в ядерной медицине, радиационных технологиях и появились только благодаря развитию атомной промышленности).
- Десятки различных сложнолегированных нержавеющей сталей и сплавов, которые нашли и находят применение в различных областях промышленности.
- Дефектоскопы с радиоизотопами, обнаруживающими дефекты в материалах и изделиях — трубопроводах, мостах и т.д.
- Приборы с радиоизотопами для изучения химического состава элементов (с их помощью был определен состав грунта на Луне и Марсе; аналогичные приборы используют геологи для изучения руд в труднодоступных территориях, где нет электричества; с помощью нейтроннографии (пучков нейтронов) изучают не просто структуры материалов, но и целых сложных изделий, например собранных конструкций автомобильных двигателей).

структуры из их регулярных положений и перемещение атомов под действием нейтронного излучения), а в материалах корпуса атомного реактора — менее 1 СНА. Что это значит? Это означает, что для корпуса атомного реактора подходит высокопрочная толстая перлитная сталь, а для внутрикорпусных устройств нам нужна нержавеющая хромоникелевая сталь, которая себя замечательно ведет в воде первого контура и более устойчива к нейтронной бомбардировке. И вдруг через 30 лет мы начинаем замечать на нержавеющей стали коррозионные трещины, несмотря на то что в воде первого контура нет кислорода. В чем причина коррозионного разрушения? Как оно зародилось? Так мы приходим к пониманию совершенно других механизмов, вызывающих повреждения. Требования атомной энергетической отрасли позволяют нам окунуться в море неизведанного, и наша задача — хотя бы на шаг опережать возникающие обстоятельства, чтобы справиться с ними с помощью научного анализа. К величайшему сожалению, пока это не всегда удается.

Есть помимо физико-химических и прочностных требований к материалу такое его свойство, как технологичность. С материалом же надо работать. Допустим, есть какой-то материал с потрясающими стойкими и долговечными свойствами. Но я не могу из него сделать реактор, потому что я не могу сделать из него большую поковку (обработанный ковкой блок металла), получить требуемые размеры. Приведу пример: водо-водяной реактор на быстрых нейтронах со сверхкритическими

параметрами воды. Сейчас перед нами стоит проблема, связанная с СКД-реактором, — там температура воды составляет около  $600^{\circ}\text{C}$ , а давление — 220–240 атм. Нужно создать огромный сосуд, который будет это все выдерживать. Одно из решений — «запереть» воду высокой температуры внутри объема реактора так, чтобы она не попадала к границам корпуса. Тогда я могу применить примерно такую же сталь, что и для обычных реакторов. Но могу пойти и по другому пути. Существует хромистая сталь, содержащая 12% хрома, которая по своим параметрам при температуре  $570\text{--}600^{\circ}\text{C}$  спокойно обеспечит нужные мне характеристики. Но беда в том, что еще никому в мире не удалось получить поковку из этой стали свыше 50 т. А нам надо 300 т. Отличный материал, но технологических возможностей для его использования пока нет. Получается, что близок локоть, да не укусишь. Решение этой проблемы — одна из важных задач материаловедения на ближайший период. И второй важнейший вопрос в разрезе применения материалов для разных задач — это возможность на выходе получить объект, соответствующий поставленным задачам. А объект состоит из разных частей, для соединения которых, как правило, иногда нужно использовать сварку, но не забудьте, что каждую часть еще надо изготовить. В процессе изготовления эти части проходят целый ряд технологических операций, и при этом материал должен выстоять, пройти через эти операции, включая сварку, и не разрушиться.

### Эволюция или революция?

— За полвека существования атомного материаловедения произошли ли какие-либо прорывные открытия, качественно изменившие отрасль?

— Базовое требование отрасли — приоритет безопасности. Безопасность определяется прежде всего объемом знаний о материале или предмете, который мы с вами имеем или используем. И, допустим, просто сесть, закрыть глаза и придумать какой-либо материал с уникальными свойствами в атомной энергетике не получится — он не будет соответствовать нормам безопасности. Поэтому в данной области задача разработать что-то новое, ранее неизвестное человечеству разбивается о требования по безопасности и эксплуатационной надежности. Это с одной стороны.

С другой стороны, вот появляются новые задачи: например, создать космический атомный реактор. В таком объекте помимо собственно реактора есть еще турбина. В процессе работы в турбине возникают сверхвысокие температуры. Чтобы она не разрушилась, тепло надо отводить. А теплоотводящей среды в космосе нет в принципе. Можно пойти по конструкционному пути — усложнить конструкцию, сделать искусственный теплосъем. А если использовать жаростойкие материалы,

например керамику? Этот материал выдерживает  $1300\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ . Но существующие виды керамики могут разрушиться под воздействием нейтронного излучения, да и сам материал очень хрупкий. Значит, надо идти по пути расширения спектра применения керамики, решить задачу по созданию нового материала: керамики, устойчивой к воздействию радиации, более пластичной, способной выдерживать высокие температуры. И кто первым придет к созданию такого материала, тот станет лидером в данной области. А «побочным эффектом» будет возможность использовать керамику в различных технологических производственных процессах в областях, не связанных с атомной отраслью. Это будет прорывом. И я очень надеюсь, что следующее поколение достигнет успеха. Моя мечта — сделать керамическую турбину для космического ядерного двигателя и создать композитный или керамический корпус газового атомного реактора.

К сожалению, у нашего государства слишком прагматичная позиция, когда речь идет о выделении финансирования на фундаментальную науку, в связи с чем нам трудно не отстать от наших конкурентов в Америке, Франции и Японии.

Но в целом материаловедение — это эволюционная наука, а не революционная.

— То есть процесс направлен не в сторону открытия чего-то нового, а в сторону совершенствования того, что уже существует и используется?



## ГРАНИ ЛИЧНОСТИ

### ГЕОРГИЙ ПАВЛОВИЧ КАРЗОВ

Доктор технических наук, профессор.

- Заместитель генерального директора Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов, начальник научно-производственного комплекса «Материалы и вопросы безопасности энергетических установок».
- Родился в Выксе Нижегородской (Горьковской) области.
- В 1961 г. окончил Ленинградский политехнический институт, с тех пор работает в ЦНИИ КМ «Прометей».
- Лауреат Государственной премии СССР, заслуженный деятель науки Российской Федерации, награжден орденом Дружбы.
- Лауреат Государственной премии в области науки и технологий 2012 г. совместно с Я.И. Штромбахом и А.В. Дубом за создание нового класса материалов для атомных реакторов.
- Мастер спорта СССР по парусному спорту.

— Это не совсем так, ведь развитие любой отрасли техники невозможно без создания чего-то нового, в том числе и материалов. Просто в атомной энергетике в связи с доминантным требованием обеспечения безопасности работы появление чего-то нового невозможно без глубокого обобщения и анализа уже пройденного пути.

Например, в 2013 г. мы (я, Я.И. Штромбах и А.В. Дуб), получили Государственную премию РФ в области науки за создание нового класса высокорadiационностойких материалов для корпусов атомных реакторов и методов продления сроков их эксплуатации. Фактически мы сделали новую сталь. Но если разобраться, то эта сталь стала итогом развития всего цикла исследований, начиная с 1953 г. Все это время мы совершенствовали материалы, получали новые знания, данные, параметры. Это длительный цикл исследовательских работ. Появление нового материала — вершина пирамиды, а фундаментом этой пирамиды служат десятки или даже сотни материалов и компонентов, которые наши ученые изобретали и получали в течение 60 лет.

Другое дело, что новый материал имеет наилучшие показатели по радиационной стойкости, прочности в больших сечениях, стабильности при длительных тепловых выдержках и другим параметрам, что открывает для нас новые возможности и позволяет отвечать на новые вызовы. Но без той фундаментально-практической базы мы бы

не смогли ничего получить сейчас. Я даже на вручении у президента процитировал Ньютона: «Мы стояли на плечах гигантов!» Наша разработка основана на труде трех поколений исследователей, инженеров, испытателей. И если бы этих поколений не было, то никакого прорывного в качественном плане результата мы бы не получили.

Конечно, у нас есть стремление к революционному скачку, но нашей доминантой была, есть и будет эволюция.

**— Имеют ли достижения атомного материаловедения какое-нибудь применение в быту? В промышленности?**

— Конечно. Развитие информационных технологий, всеобщий доступ к информации позволяют использовать достижения атомной промышленности в различных сферах и областях. Правда, не все так просто. Новые знания нужно уметь и иметь возможность применять, т.к. существуют сложности технологического свойства.

Показательный пример: наша хромомолибденованадиевая сталь для атомных реакторов сейчас применяется практически для всех реакторов нефтехимии. Из нее делают сосуды для реакторов гидрокрекинга. Мы впервые создали титан как конструкционный материал, а теперь он используется практически повсеместно. Таких примеров можно привести много.

Можно сказать, что мы как бы возвращаем долги, поскольку вначале атомная энергетика заимствовала материалы из других областей, а теперь предоставляет новые решения и материалы для этих же областей.

**— «Росатом» — лидер в области атомного материаловедения. Сумеет ли корпорация сохранить за собой лидерство? Или возможна какая-нибудь кооперация для укрепления позиций?**

— Во-первых, «Росатом» — это крупнейший потребитель сложных композиционных материалов. Но далеко не все материалы создаются в атомной отрасли. Они часто разрабатываются по инициативе атомной промышленности в других областях, в частности в нашем институте ЦНИИ КМ «Прометей», и здесь очень важно, чтобы чиновники «Росатома» понимали полезность и необходимость таких контактов для эффективного развития атомной отрасли и не блокировали, а всячески поддерживали их.

Во-вторых, следует отметить, что в атомной отрасли исторически сложился абсолютно другой уровень коллективного мышления, заложенный еще отцами-основателями отрасли. И если этот уровень сохранится (а он пока сохраняется), то мы всегда будем лидерами — и в материаловедении в том числе. ■

Беседовал Виктор Фридман

# Перспективные разработки «Росатома»

## ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В настоящее время в «Росатоме» разрабатываются два вида ядерного топлива для ядерных реакторов на быстрых нейтронах — плотное смешанное уран-плутониевое топливо ( $UPu$ )N и смешанное уран-плутониевое оксидное топливо (MOX-топливо).

Другими перспективными направлениями остаются плотное металлическое легированное ядерное топливо и микросферическое топливо. Металлическое легированное топливо привлекательно для применения в исследовательских ядерных реакторах с низким обогащением по урану-235. В организациях «Росатома» имеются собственные оригинальные разработки, опытные изделия уже поставляются в исследовательские ядерные реакторы Казахстана. Существуют подтвержденные данные о возможности и эффективности использования сплава урана, плутония и циркония в исследовательском ядерном реакторе на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем МБИР, который планируется ввести в эксплуатацию в 2020 г. Основные преимущества этого вида топлива — простота изготовления и накопленный положительный опыт эксплуатации до высоких выгораний 20% т.а. (штатное выгорание оксидного топлива в реакторе БН-600 не превышает 11% т.а.). В металлическое топливо легче вводить минор-актиниды для выжигания. Производства первых таких изделий можно ожидать в ближайшем десятилетии взамен изделий, использующих радиоизотопы плутония-239 и стронция-90.

Экспериментально подтверждена и возможность эффективного использования микросферического ядерного топлива (типа TRISO) в ядерных реакторах с водным теплоносителем, что позволит отказаться от использования циркония в тепловыделяющих сборках

и исключить паро-циркониевую реакцию с выделением водорода при аварийных ситуациях. С этим эффектом связаны все аварии на АЭС начиная с Три-Майл-Айленда и до Чернобыля и Фукусимы. Широкое применение данных технологий потребует коренного пересмотра конструкций ядерных реакторов на тепловых нейтронах, но вероятность развития данного направления достаточно велика и может реализоваться к 2030–2040-м гг.

## КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В «Росатоме» ведутся работы и по созданию новых конструкционных материалов. Стоит задача по разработке к 2020–2025 гг. сталей и сплавов, обеспечивающих надежную эксплуатацию элементов активных зон до повреждающих доз 200 смещений на атом (СНА), что в два раза выше используемых в настоящее время для элементов активных зон ядерного реактора на быстрых нейтронах БН-600. Испытания материалов, которые должны эксплуатироваться до повреждающих доз 400 СНА, ведутся в российском реакторе на быстрых нейтронах БОР-60. Их планируется продолжить в строящемся реакторе МБИР. Одно из самых перспективных направлений — разработка композиционных материалов на основе SiC-SiC для всех типов ядерных реакторов, поскольку ожидается, что их эксплуатационные характеристики позволят обеспечить надежную работу элементов активных зон в очень широком диапазоне теплоносителей, температур и повреждающих доз.

Разработан целый класс поглощающих материалов на основе оксидов редкоземельных и тугоплавких элементов с разупорядоченной флюоритной структурой. Эти материалы имеют неограниченную радиационную стойкость, не изменяют своего объема, формы, размеров при повреждающих дозах выше 200 СНА.



**Основатель и первый главный редактор журнала «В мире науки / Scientific American», профессор СЕРГЕЙ ПЕТРОВИЧ КАПИЦА**

## НАШИ ПАРТНЕРЫ:



Российская Академия Наук

О Ч Е В И Д Н О Е



НЕВЕРОЯТНОЕ



РОСАТОМ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

### Учредитель и издатель:

Некоммерческое партнерство «Международное партнерство распространения научных знаний»

### Главный редактор:

Первый заместитель главного редактора:

### Директор:

Исполнительный директор:

Исполнительный продюсер:

### Шеф-редактор:

Ответственный редактор:

Литературный редактор:

Обозреватели:

Арт-директор:

Инфографика:

Фотограф:

Администратор редакции:

Над выпуском работали:

В.Н. Гранкова, О.Б. Иванов, А.А. Козлов, А.П. Кузнецов, Н.Л. Лескова, М.М. Петров, А.Е. Титков, В.П. Фридман

Верстка:

Корректур:

Президент координационного совета

НП «Международное партнерство

распространения научных знаний»:

Директор НП «Международное партнерство

распространения научных знаний»:

Финансовый директор:

Главный бухгалтер:

**В.Е. Фортв**

**А.Л. Асеев**

**С.В. Попова**

П.Н. Антонов

В.К. Рыбникова

О.И. Стрельцова

М.А. Янушкевич

О.Л. Беленицкая

В.С. Губарев, В.Ю. Чумаков

Д.В. Левин

С.М. Дубровский

Н.Н. Малахин

О.М. Горлова

Р.Ю. Атжанов, Д.А. Гранков,

В.Н. Гранкова, О.Б. Иванов, А.А. Козлов, А.П. Кузнецов, Н.Л. Лескова, М.М. Петров, А.Е. Титков, В.П. Фридман

А.Р. Гукасян

Я.Т. Лебедева

**В.Е. Фортв**

**С.В. Попова**

Л.И. Гапоненко

Е.Р. Мещерякова

### Редакция журнала «В мире науки»

благодарит за помощь в подготовке спецвыпуска:

**В.А. Першукова**, члена правления госкорпорации «Росатом», заместителя генерального директора — директора Блока по управлению инновациями;

**Е.О. Адамова**, научного руководителя АО «НИКИЭТ»;

**А.В. Дуба**, генерального директора АО «Наука и инновации»;

**А.Я. Резниченко**, директора по коммуникациям АО «Наука и инновации»;

**К.В. Иванова**, начальника отдела внешних и внутренних коммуникаций АО «Наука и инновации», а также всех, кто принимал участие в работе над номером.

### Научные консультанты:

акад. РАН **Е.Н. Аврорин**;

д.т.н., проф., акад. Российской инженерной академии

**Е.О. Адамов**; д.б.н., проф., засл. деятель науки РФ, акад.

РАН **Р.М. Алексахин**; д.т.н., проф. **В.Г. Асмолов**; акад. РАН

**Е.П. Велихов**; д.т.н., проф., член-корр. РАН **Ю.Г. Драгунов**;

акад. РАН **Р.И. Ильяев**; д.м.н., проф., член-корр. РАН

**А.Д. Каприн**; д.т.н., проф. **Г.П. Карзов**;

д.т.н., проф. **Е.П. Клочков**; д.т.н., проф., акад. РАН

**Н.Н. Пономарев-Степной**; д.т.н. **В.Д. Рисованный**;

проф., акад., советник РАН **А.А. Саркисов**; д.ф.-м.н., акад. РАН

**В.П. Смирнов**; д.т.н., проф. **Г.И. Тошинский**;

д.т.н., проф. **Я.И. Штрэмбах**

**Адрес редакции:** Москва, ул. Ленинские горы, 1, к. 46, офис 138; тел./факс: 8 (495) 939-42-66; e-mail: info@sciam.ru; www.sciam.ru

**Отпечатано:** в АО «ПК «ЭКСТРА М», 143405, Московская область, Красногорский р-н, г. Красногорск, автодорога «Балтия», 23-й км, владение 1, д. 1

Заказ Спецвыпуск-2015 15-07-00343

© **В МИРЕ НАУКИ.** Журнал зарегистрирован в Комитете РФ по печати. Свидетельство ПИ № ФС77-43636 от 18 января 2011 г.

**Тираж:** 12 500 экземпляров

Цена договорная

Все права защищены. Перепечатка текстов и иллюстраций только с письменного согласия редакции. При цитировании ссылка на «В мире науки» обязательна. Редакция не всегда разделяет точку зрения авторов и не несет ответственности за содержание рекламных материалов. Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

Цикл телепрограмм

# ИДЕИ, МЕНЯЮЩИЕ МИР

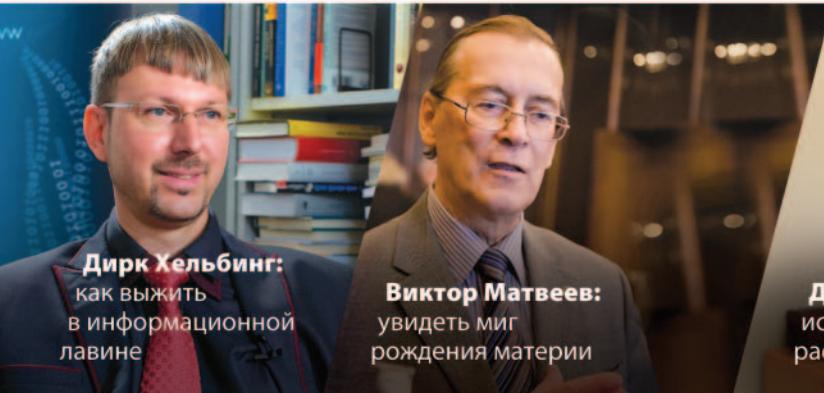


Автор и ведущая —  
**Эвелина Закамская**

**РОССИЯ 24**

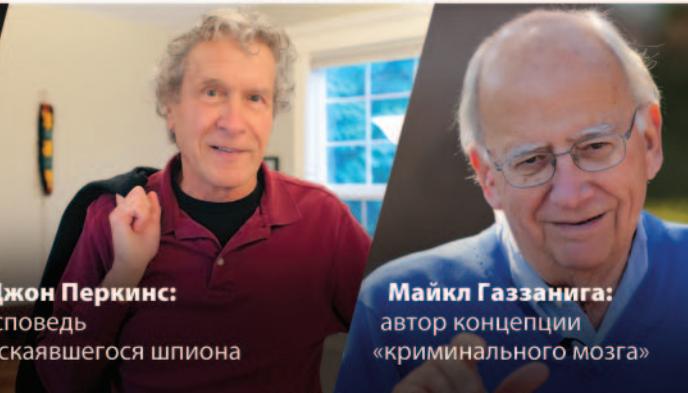
**очевидное  
невероятное**

ИНТЕРНЕТ-ПОРТАЛ  
**НАУЧНАЯ  
РОССИЯ**



**Дирк Хельбинг:**  
как выжить  
в информационной  
лавине

**Виктор Матвеев:**  
увидеть миг  
рождения материи



**Джон Перкинс:**  
исповедь  
раскаявшегося шпиона

**Майкл Газзанига:**  
автор концепции  
«криминального мозга»



**Михаил Ковальчук:**  
НБИКС-конвергенция —  
цивилизационный взрыв



**Рольф-Дитер Хойер:**  
человек, объявивший  
о «поимке» бозона Хиггса



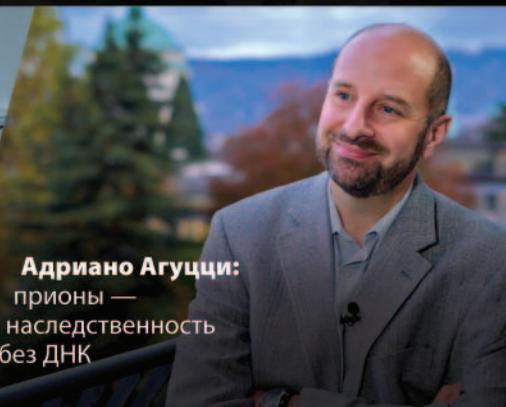
**Ноам Хомский:**  
интеллектуал  
Западного полушария



**Джин Шарп:**  
человек, взорвавший мир

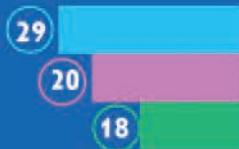


**Бертран Пикар:**  
вокруг света  
на энергии Солнца



**Адриано Агуцци:**  
прионы —  
наследственность  
без ДНК

# ПРОЕКТЫ «РОСАТОМА»\* за рубежом: реальность и перспектива



Проекты в стадии реализации  
В стадии тендеров или переговоров  
Потенциальные проекты

