

# ВЕСТНИК АТОМПРОМА

№3 | апрель | 2024

*Главная тема*

## **Термоядерный синтез**

*Перспективы развития  
термоядерных и плазменных  
технологий в России и в мире*

*В номере*

Технологический суверенитет 34

Переработка РАО 37

Энергетические системы поколения IV 44



# Уважаемые читатели!

Международная гонка за термоядерным суперпризом — мощнейшим и потенциально неисчерпаемым источником чистой энергии — становится все динамичнее. Правда, скептики продолжают считать, что до практического освоения энергии термоядерного синтеза по-прежнему довольно далеко. Но есть и противоположный взгляд: в связи с развитием лазерных, сверхпроводниковых и других высоких технологий и растущим интересом государств и частных инвесторов к термоядерной энергетике мы сможем увидеть энергетические термоядерные реакторы или по крайней мере их прототипы уже на горизонте десятилетия.

В России ведутся масштабные исследования и разработки в области управляемого термоядерного синтеза, и Росатом играет в этом важнейшую роль. Материалы главной темы номера рассказывают, какую работу ученые и инженеры всего мира ведут для того, чтобы открыть новую страницу в истории человечества.

Кроме того, вы узнаете о диверсификации производства на предприятиях ОПК атомной отрасли, о возможностях и перспективах ядерных энергетических систем поколения IV и о решениях для переработки РАО и транспортировки и хранения ОЯТ, а также вспомните вместе с нами яркие моменты Международного форума «Атомэкспо-2024».

**ВЕСТНИК  
АТОМПРОМА**

№ 3, апрель 2024 года

Информационно-аналитическое издание

Фото на обложке  
ITER

**Главный редактор**  
Юлия Долгова  
dolgova@strana-rosatom.ru

**Выпускающий редактор**  
Ольга Еременко

**Дизайн и верстка**  
Анна Бабич, Валерий Балдин

**Корректор**  
Алина Бомбенкова

**Учредитель, издатель и редакция**  
Общество с ограниченной ответственностью «НВМ-пресс»

**Адрес редакции**  
129110 Москва,  
ул. Гиляровского, д. 57, с. 4

**Отдел распространения и рекламы**  
Татьяна Сазонова  
sazonova@strana-rosatom.ru  
+7 (495) 626-24-74

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации СМИ  
ПИ №ФС77-59582  
от 10 октября 2014 года

Тираж 1980 экземпляров.  
Цена свободная.  
Подписано в печать: 18.04.2024

При перепечатке ссылка на «Вестник Атомпрома» обязательна. Рукописи не рецензируются и не возвращаются

Суждения и выводы авторов материалов, публикуемых в «Вестнике Атомпрома», могут не совпадать с точкой зрения редакции

Журнал отпечатан:  
ООО «АртФормат»  
115477, г. Москва, ул. Зюзинская, д. 6, стр. 2.  
Тел.: +7 (968) 724-35-91  
№ заказа: Аф-003/24.

## Содержание

Главная тема

КОРОТКО

**Рукотворное солнце** **4**

Что нужно, чтобы человечество получило потенциально неисчерпаемый источник чистой энергии и что для этого делается в России

ПРЯМАЯ РЕЧЬ

**«Наличие и ядерной, и термоядерной школ — это колоссальное преимущество нашей страны»** **6**

Анатолий Красильников, директор Частного учреждения госкорпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», — о значении международного проекта и российской программе развития технологий управляемого термоядерного синтеза

ТЕХНОЛОГИИ

**Термоядерное мастерство** **14**

В России создают уникальное оборудование для отечественных и международных проектов в области термоядерного синтеза

ПРОЕКТЫ

**Троицкая пятерка** **18**

Современные термоядерные проекты ГНЦ РФ ТРИНИТИ

НАУКА

**Термояд сегодня, завтра и послезавтра** **20**

Ученые обсудили результаты актуальных исследований в области управляемого термоядерного синтеза

МНЕНИЕ

**От физики к технологиям** **24**

Решения, которые появляются в работах по УТС, могут быть востребованы в самых разных областях

МЕЖДУНАРОДНОЕ  
ОБОЗРЕНИЕ

**Звезды зажигают** **26**

Оптимистический взгляд на коммерческое будущее термоядерных технологий

ФОТОРЕПОРТАЖ

**Международный атом** **30**

Вспоминаем яркие моменты форума «Атомэкспо-2024»

Премия

**Награда для «Атомного Оскара»** **32**

Программа признания «Человек года Росатома» удостоена высокой оценки

Технологический суверенитет

**О людях и для людей** **33**

Фильм «Росатом — это мы» и видеопродукты Инжинирингового дивизиона стали победителями всероссийского конкурса «Лучшее корпоративное видео»

Технологии

**Диверсификация на вырост** **34**

Предприятия ОПК атомной отрасли перевыполнили план производства высокотехнологичной гражданской продукции

Технологии

**Сжечь и обезвредить** **37**

Новая технология переработки РАО для Курской АЭС-1

ИЦАЭ

**ТУК в помощь** **40**

Росатом создает востребованную рынком линейку систем для транспортировки и хранения ОЯТ

ИЦАЭ

**Подрастающее поколение** **44**

Развитие перспективных технологий ядерных энергетических систем

ИЦАЭ

**По следам тора: что скрывает термоядерный бублик?** **52**

Как физические открытия, научные разработки и новые технологии меняют язык

Книжная полка

**Конкуренция как стратегия непрямых действий** **56**

Как выигрывать, не сражаясь

**Уточнение** к интервью «Новая вузовская композиция», опубликованному в №2 «Вестника атомпрома» за 2024 год, в котором была неверно указана должность Дмитрия Сахарова: по информации, предоставленной в письме пресс-службы РХТУ им. Д. И. Менделеева от 08.04.2024 года, в настоящее время Дмитрий Сахаров занимает должность проректора по экономике и инновациям и доцента кафедры химии высоких энергий и радиоэкологии РХТУ им. Д. И. Менделеева.

# Рукотворное солнце

Термоядерный синтез — это процесс, в ходе которого два легких атомных ядра объединяются в одно более тяжелое ядро с высвобождением огромного количества энергии. Солнце, как и другие звезды, излучает энергию именно благодаря реакции термоядерного синтеза. Реакции синтеза происходят в агрегатном состоянии вещества, называемом плазмой — горячем заряженном газе, состоящем из положительных ионов и свободно движущихся электронов, который обладает уникальными свойствами, отличными от свойств твердых тел, жидкостей или газов.

Условия для термоядерного синтеза на Солнце обеспечивает колоссальное давление, создаваемое мощной гравитацией. Без этой силы для запуска реакции на Земле необходима температура даже выше, чем внутри Солнца, при этом нужно соблюдать ряд других условий, понятных в теории, но сложно осуществимых на практике,— для обеспечения стабильного удержания плазмы и поддержания реакции синтеза в течение достаточно долгого времени, чтобы произвести больше энергии, чем потребовалось для ее запуска.

На протяжении десятилетий физики говорят, что термоядерный синтез однажды станет экологически чистым, безопасным и потенциально неисчерпаемым источником энергии. В процессе синтеза выделяется значительно больше энергии, чем при реакции деления ядра, причем без образования долгоживущих радиоактивных отходов, а запасов топлива для термоядерного синтеза теоретически должно хватить как минимум на миллионы лет. Но возможность осуществить и контролировать этот процесс, а тем более сделать его

коммерчески выгодным, все еще ускользает от ученых и инженеров. Однако перспектива перехода от исследований на экспериментальных установках к строительству промышленных энергетических термоядерных реакторов сейчас выглядит как никогда обнадеживающе.

Наиболее технически проработанное на сегодняшний день решение для осуществления управляемого термоядерного синтеза — магнитное удержание плазмы в установках типа токамак — родилось именно в нашей стране. В настоящее время Россия — один из мировых лидеров как в области фундаментальных исследований, так и в воплощении их результатов для последующего вывода термоядерных технологий на уровень практической энергетики. Российские специалисты вносят весомый вклад в проект международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР, ведут исследования и разработки в области физики плазмы и инновационных плазменных технологий в рамках федерального проекта по термоядерным и плазменным технологиям Комплексной программы «Развитие атомной науки, техники и технологий» (КП «РТТН»), в том числе работают над созданием в России токамака с реакторными технологиями (РТТ) — экспериментальной установки, которая разрабатывается в качестве полноценного плазменного прототипа как чистого термоядерного реактора, так и термоядерного источника нейтронов для гибридного реактора.

Главная тема номера рассказывает о последних мировых событиях в сфере термоядерного синтеза и о достижениях российских исследователей и разработчиков, в том числе из организаций и научных институтов Росатома.

Текст: Алексей Комольцев

Фото: ЧУ «Проектный центр ИТЭР», газета «Страна Росатом», ITER

Анатолий Красильников, директор Частного учреждения госкорпорации «Росатом» «Проектный центр ИТЭР»:

## «Наличие и ядерной, и термоядерной школ — это колоссальное преимущество нашей страны»

Более полувека назад физики лирическим голосом артиста Алексея Баталова, сыгравшего главную роль в фильме «Девять дней одного года», ответили непосвященным на вопрос, не напрасно ли на создание ядерных и термоядерных технологий идут такие затраты — денежные и временные, моральные и материальные, издержанные и еще предстоящие. Ответ был таким: «Не зря. Когда-нибудь люди скажут нам спасибо. А кроме того, мысль остановить нельзя». Хотя управляемый термоядерный синтез по-прежнему не обуздан, он прочно удерживает место главной надежды на энергетическое счастье рода человеческого. Собеседник «Вестника атомпрома», директор российского агентства ИТЭР Анатолий Красильников, уверен: участие в этом проекте уже сегодня окупаются технологиями, мотивацией к развитию, созданием новой инженерной культуры. А загнать энергию синтеза на турбину и далее в народное хозяйство, как это уже случилось с энергией деления атомов, — вопрос воли и дело принципа.

— Анатолий Витальевич, проект ИТЭР был инициирован в эпоху разрядки и нового мышления середины 1980-х, отчасти как символ отказа от международной конфронтации. Сегодня обстановка в мире далека от идеальной, но ИТЭР продолжает развитие. Почему?

— Действительно, проект был инициирован в середине 1980-х, когда великие державы, целые политические блоки «первого» и «второго» мира вышли из холодной войны и задумались о разрядке и сотрудничестве. Для этого потребовались проекты-локомотивы, сомасштабные уровню стран-лидеров.

Задачи проекта ИТЭР лежали в нескольких измерениях — физико-техническом, политическом, цивилизационном. Физико-техническое измерение — показать возможность использования реакции



термоядерного синтеза, решив физические и технологические проблемы на этом пути. Политическое — показать, что мир изменился и противники вместо гонки вооружений способны объединить усилия в мирных целях. Наконец, цивилизационное — показать, что политические системы и сиюминутные интересы вторичны, поэтому не просто страны, а целые цивилизации — русская, англосаксонская, китайская и индийская — могут работать совместно на общее благо. За почти четыре десятилетия, в течение

которых развивается этот проект, он приносит свои плоды во всех трех измерениях.

В значительной мере ИТЭР уже работает: это создание и отработка технологий, мотивация к образованию, энергетическая перспектива. Происходит разработка, оценка, совершенствование методов работы с плазмой. Ведущие ученые всего мира взаимодействуют, созданы целые научные школы. Действительно, состоялось объединение цивилизаций: если раньше Азия была представлена одной Японией, то с годами к проекту присоединились Китай, Южная Корея, Индия; сохраняют свою вовлеченность Евросоюз и США, и, разумеется, активным участником является Россия.

Часто задают вопрос, скоро ли будет получен практический, коммерческий результат. Шутка о том, что «до осуществления термоядерного синтеза остается все время 20 или 30 лет», известна примерно полвека; но также в памяти физиков есть и слова Льва Арцимовича: «Термоядерная энергетика будет создана, когда станет действительно необходимой человечеству».

— Становятся ли уже термоядерные технологии остро необходимыми, как предсказывал Арцимович?

— Среди участников ИТЭР мотивация вести проект к практическому результату находится на разном уровне. Наша страна в уникальном положении: мы обеспечены сами и обеспечиваем других углеводородами, удерживаем передовые позиции в ядерной энергетике, даже потенциал для строительства ГЭС далеко не исчерпан, с ВИЭ только начинаем. США тоже относительно хорошо обеспечены энергоресурсами. Казалось бы, страны-инициаторы не нуждались и не нуждаются в ИТЭР как в жизненной необходимости. США даже выходили из проекта на какое-то время, но затем вернулись: все-таки тот энергетический приз, которого ожидают участники, безусловно, стоит потраченных усилий, а национальные термоядерные программы невозможно вести в изоляции.

Но для других участников, таких как Евросоюз, Китай, Индия, Япония, Южная Корея, практический ожидаемый результат освоения термоядерной энергии уже намного важнее, он приближается к степени острой необходимости. И эти участники вкладывают силы и средства не только по той причине, что быть в ИТЭР престижно и целесообразно, но и в расчете на жизненно необходимый скорейший положительный результат. Не хочется давать прогнозов, но думаю, что до результата уже остается меньше, чем вечный 20-летний срок из шутки. Китай и Индия с их более чем миллиардной численностью населения убедились, что обычные ресурсы исчерпаемы. Атомная энергетика набирает влияние, благодаря проекту замыкания топливного цикла она рассчитывает выйти на самовоспроизводство топлива, но есть опыт тяжелых аварий, который привел к радиофобии и мешает развитию этого направления в ряде стран.

Предпосылки международного исследовательского проекта в области термоядерной энергетики складывались еще в конце 1970-х, первая попытка — с участием СССР, США, Японии и стран Западной Европы — называлась INTOR. Идея академика Евгения Велихова предложить международному сообществу возобновить совместный проект экспериментального термоядерного реактора была представлена Михаилу Горбачеву. Новая инициатива нашей страны, будущий ИТЭР, получила поддержку Франсуа Миттерана, президента Франции; затем Горбачев озвучил данную идею Рональду Рейгану в Женеве. Президент США уже был подготовлен к этому разговору американскими учеными, понимал, что проект важен для науки и политики. На старте объединились три участника — СССР, США и страны Европейского сообщества. Вскоре добавились Япония, и затем довольно долго проект объединял четыре стороны-участницы (хотя, поскольку Европейское сообщество насчитывало более десятка стран, можно считать, что участников было изначально больше).

А управляемый термоядерный синтез — это возможность получения огромной энергии при нулевом риске существенных аварий.

В сообществе ученых, которые задействованы в ИТЭР, есть понимание, что благодаря этому проекту будет в существенной мере наработана технологическая платформа для создания коммерческого термоядерного синтеза. Нарботана не в полной мере, поиск продолжается. Но если будет воля государств сделать «обязательно и к сроку», как было с военными ядерными программами, то проект будет осуществлен и в ближней перспективе, может быть пяти, может быть десяти лет. Когда именно? Для этого надо ответить на вопрос, какова ситуация сейчас в проекте.

— И какова же она?

— Прежде всего, изменилась (на мой взгляд, к лучшему) кадровая составляющая в руководстве. Ранее проект представляли тоже достойные руководители, но это были дипломаты, химики, иногда специалисты по плазме, но без опыта создания токамаков. Год назад Международную организацию ИТЭР возглавил новый генеральный директор Пьетро Барабаски — очень энергичный, суперпрофессиональный руководитель. Ему 56 лет, в ИТЭР он с возраста аспиранта, многие годы работал на лидирующих инженерных позициях. Проект он знает как инженер, изнутри. Он привлек профессионалов высочайшего класса. Один из заместителей, Ютака Камада, — руководитель

## «Управляемый термоядерный синтез — это возможность получения огромной энергии при нулевом риске существенных аварий».

проекта JT-60SA в Японии, самого большого токамака в мире. Другой заместитель, Алан Бекюле, — абсолютный авторитет в физике нагрева плазмы различными волнами. Еще один заместитель директора, Делонг Луо, — человек, которого в проекте называют «мистер ИТЭР»: он был главой домашнего агентства и представителем в Совете ИТЭР от Китайской Народной Республики 17 лет. Также в числе заместителей — Серджио Орланди из Евросоюза, он много лет работал в индустрии сооружения плазменных и термоядерных установок, знает промышленность, профессионал в плане создания установки как целого комплекса.

Добавлю, что Пьетро Барабаски сохраняет приверженность международному, объединяющему духу проекта — в начале политических изменений он пресек любые мнения о нежелательности российского участия. В целом собрана очень профессиональная команда, и это главное изменение, которое случилось за последние несколько лет. Сегодня эти

руководители ускоряют работу. Они критически оценили ряд принятых ранее решений, выработали быструю процедуру устранения нестыковок (на этапе сборки любой машины нестыковки неизбежны, а ИТЭР — проект колоссальной сложности и масштаба, поэтому трудностей много и будут еще). Собранная команда топ-руководителей умеет оперативно, без формальностей, долгих совещаний и рабочих групп принимать решения, опираясь на опыт и профессиональные связи. Поэтому недочеты устраняются быстро.

Недочеты связаны не с тем, что кто-то не старается. Не будем забывать, что основа проекта была заложена в 1990-е — первом десятилетии 2000-х: технологии развиваются, казавшиеся тогда лучшими идеи не проходят проверку на практике. Многие компоненты этого реактора создаются впервые, вплоть до новых материалов. Как, например, были созданы многозоровые космические корабли «Шаттл» и «Буран»? Форма планера была известна уже почти столетие, в космос летать тоже умели. Но чтобы планер не обгорел, как предыдущие одноразовые капсулы, потребовалось найти новый материал облицовки, выдерживающий нагрузку от входа в атмосферу на космической скорости. В термоядерном реакторе, который мы создаем, тепловая нагрузка больше и длительней, чем те, что испытал «Буран»: ИТЭР во время работы будет одновременно самым горячим и самым холодным местом в Солнечной системе. Плазма разогрета до 300 млн °С, а охлаждение сверхпроводников близко к абсолютному нулю. Если охлаждение нарушится, возможна авария — не опасная для окружающей

среды, но болезненная для установки. Конструкции, которые надежно выдержат такой перепад температуры в течение длительного времени, предстоит изготовить.

Материал первой стенки, которая отделяет самую горячую зону, разрабатывают институты Росатома, такие как НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, ТРИНИТИ, а также ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН и другие институты Академии наук. Одно из существенных изменений, которое обсуждает Совет ИТЭР, опираясь на новый опыт, — это замена материала первой стенки с бериллия на вольфрам. Это решение непростое, предстоит взвесить плюсы и минусы. Россия активно участвует в обсуждении этой идеи, сформирован перечень нужных НИОКР, и мы ожидаем, что исследования будут заказаны нашим институтам. Работы планируем провести в сотрудничестве с коллегами из Китая, Южной Кореи и по возможности Евросоюза.

Первая стенка — лишь один пример. Другой, где тоже продолжаются поиски, — комбинация систем нагрева плазмы. В мире для термоядерных программ разрабатывают разные технологии нагрева. При ионно-циклотронном методе быстрые магнитозвуковые волны поглощаются плазмой, передают энергию и нагревают ионную компоненту. Другой подход — нагрев плазмы инъекцией пучков быстрых атомов с энергией масштаба 1 МэВ: они влетают в плазму с температурой в 30 раз ниже, передают свою энергию ионам за счет кулоновских столкновений и разогревают плазму до нужных нам термоядерных температур. Электронно-циклотронный разогрев с помощью гиротронов — еще один прогрессирующий подход, причем наша страна лидирует в этом направлении. Институт прикладной физики РАН и нижегородская компания «Гиком» — мировые лидеры по поставкам этого оборудования. Первые гиротроны работали около 10 секунд, а теперь выдерживают 1000 секунд при мегаваттной мощности, и КПД превышает 50% — эти изделия работают в термоядерных исследовательских программах всего мира. Чтобы обеспечить нужную степень нагрева, идет поиск комбинации методов и конкретных решений. Возможно, установка будет снабжена дополнительными гиротронами. Собственно, технологическая платформа ИТЭР собирается из лучших технологических разработок лучших умов из стран-партнеров.

— Есть ли сопутствующие эффекты от этой работы для российской экономики уже сегодня?

— Да, безусловно, есть. Мы подсчитали, что благодаря проекту ИТЭР в России созданы 64 точки технологического роста в наших научных центрах, работающих в интересах экономики и безопасности. В выигрыше научные и производственные предприятия, такие как НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, ВНИИНМ им. А. А. Бочвара, ТРИНИТИ, Курчатовский институт и другие. Активно вовлечены и развиваются благодаря этому институты Академии наук — Физико-технический институт, Институт прикладной физики, Институт ядерной физики. Названия короткие, а на самом

На фото

Прототип центральной сборки дивертора. Россия отвечает за изготовление и поставку на ИТЭР 25 систем



деле каждый из них — это крупнейший научно-технологический центр, каждый имеет кафедры в университетах, школы подготовки молодых кадров. Поддерживать интерес молодежи, особенно талантливой, то есть самой дефицитной, можно только за счет новых амбициозных проектов. Если опираться на одну только историю и ранее созданное, то потенциал интеллекта «диссипирует» — теряет энергию с той или иной скоростью. А новый заказ, вызов мирового масштаба, создание для этого новых разработок — совсем другое дело, другая мотивация к получению знаний и к работе. Даже если не вся эта молодежь приходит затем в термоядерное направление, им с такой подготовкой есть куда пойти: в научные центры Росатома, в направление квантовых технологий и так далее.

Яркий пример непосредственного вклада в экономику — целая отрасль производства сверхпроводников мирового уровня, созданная в нашей стране. Россия поставила для ИТЭР 220 тонн сверхпроводников — ниобий-титановых (NbTi) и ниобий-оловянных

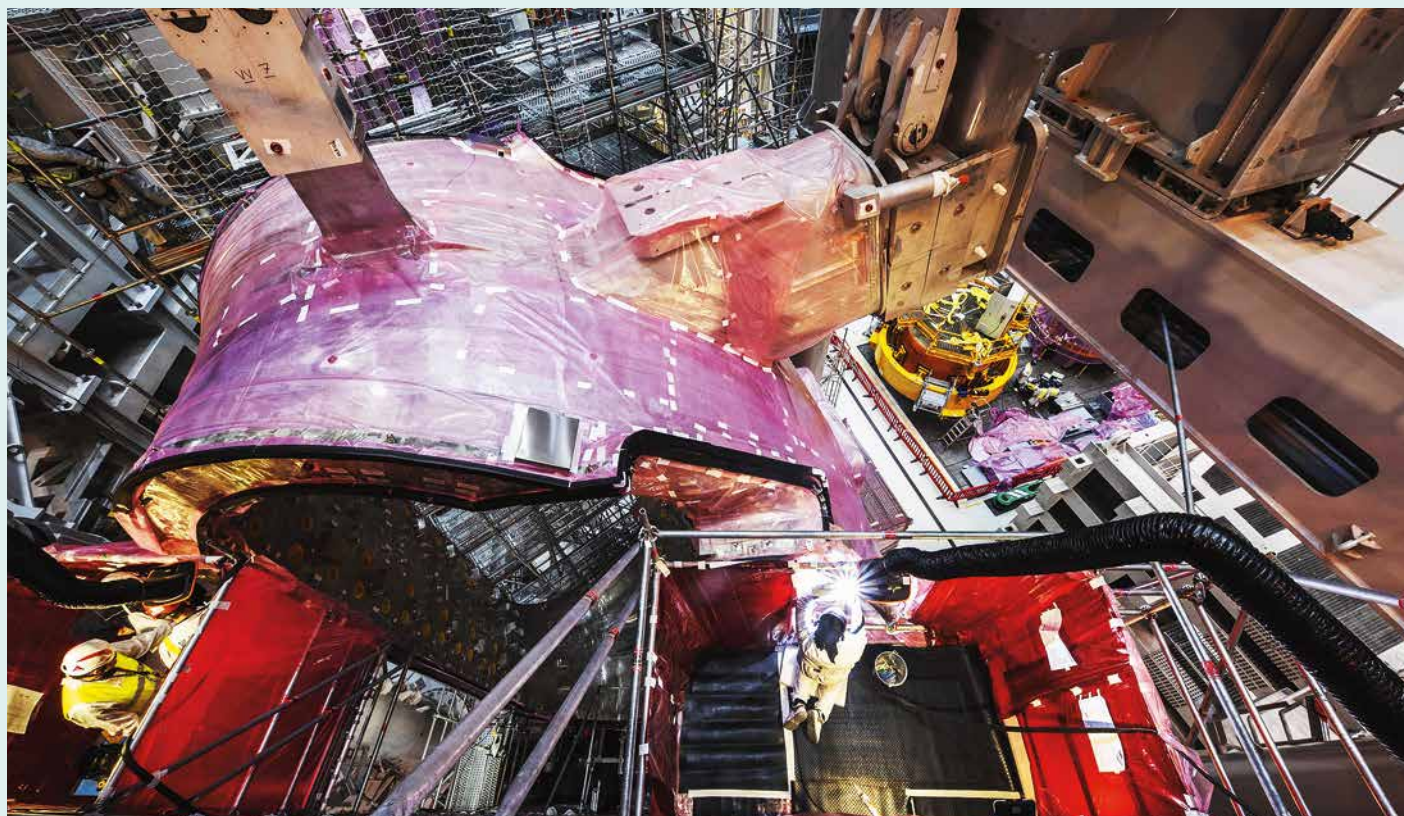
### Цифра

## до 300 млн °С

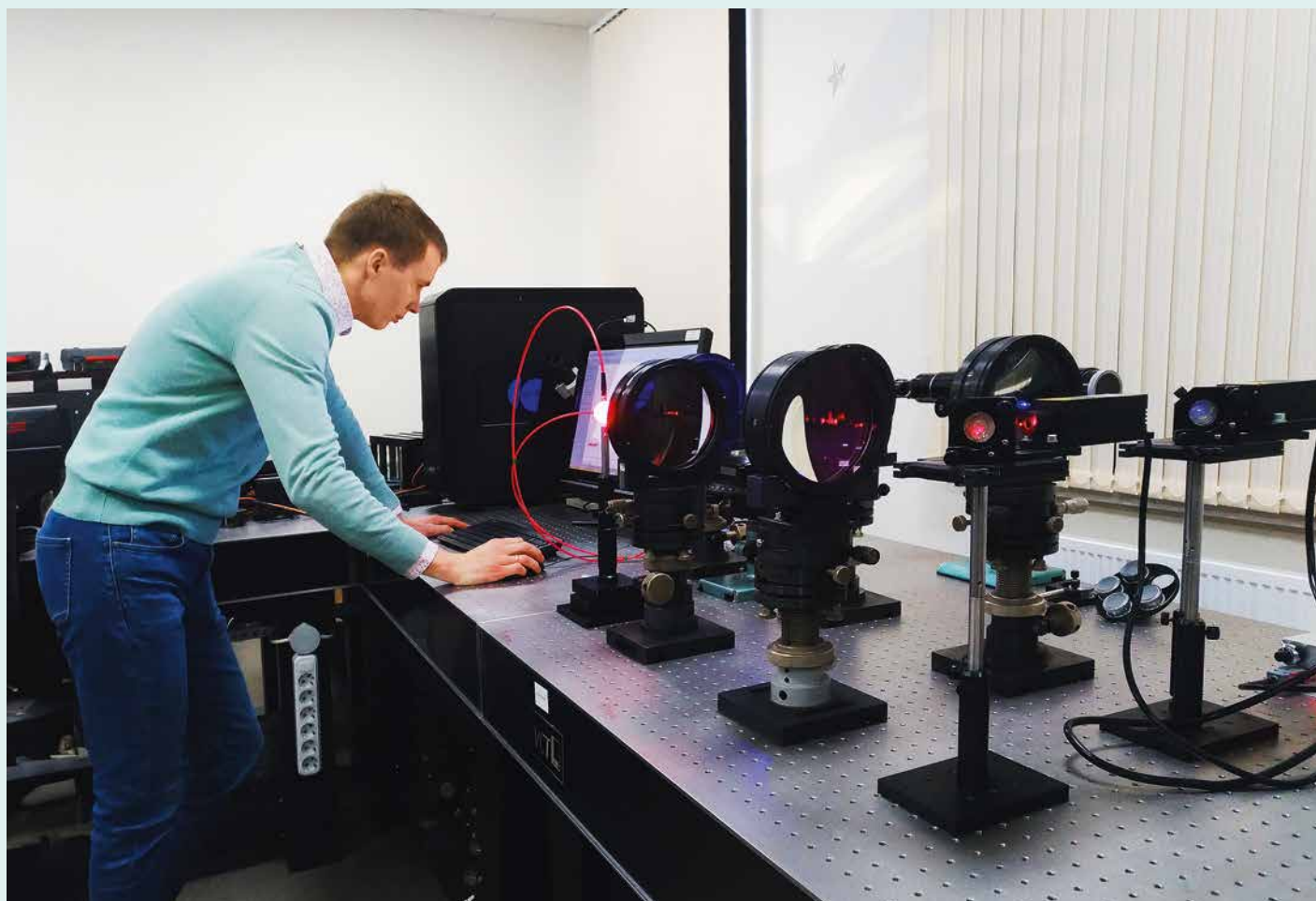
будет разогрета плазма ИТЭР, который во время работы будет одновременно самым горячим и самым холодным местом в Солнечной системе, так как охлаждение сверхпроводников близко к абсолютному нулю

На фото

Благодаря проекту ИТЭР будет в существенной мере наработана технологическая платформа для коммерческого термоядерного синтеза



Благодаря проекту ИТЭР в России созданы 64 точки технологического роста в научных центрах



( $Nb_3Sn$ ). Технологию изготовления нужной для этого проволоки (стрендов) создали во ВНИИНМ им. А. А. Бочвара. Стренды изготовили на Чепецком механическом заводе в Глазове. Далее их во ВНИИ кабельной промышленности скрутили в кабели, дополнив медной проволокой. В Институте физики высоких энергий в Протвино выполнили джекетирующие — заправку в стальные оболочки. В Курчатовском институте испытали на герметичность. Вся эта кооперация была создана благодаря ИТЭР — и она, по существу, стала целой отраслью производства сверхпроводников, лидирующей в мире. А освоение технологий сверхпроводников — это возможность делать медицинские томографы, сверхпроводниковые

магниты для физики высоких энергий, это магнитная левитация для транспорта, словом, огромные перспективы применения.

Несомненно, есть и целый ряд возможностей использовать результаты исследований по материалам первой стенки, по методам нагрева плазмы и так далее. Огромный импульс к развитию получили методы диагностики: например, благодаря ИТЭР мы создали производство алмазных детекторов для спектроскопии нейтронов с энергией 14 МэВ, быстрых атомов, заряженных продуктов. Такие детекторы поставили на установки в обнинский Медицинский радиологический научный центр им. А. Ф. Цыба — они уже эффективны в нейтронной и гамма-терапии и в перспективе будут использоваться в лечении протонами. В следующем году в Национальном медицинском исследовательском центре онкологии им. Н. Н. Блохина планируется запустить новую установку бор-нейтронзахватной терапии — там тоже будут использоваться наработки, созданные в процессе работы над ИТЭР.

Огромное развитие получили информационные технологии, сама методология работы. Весь мировой интернет начался в ЦЕРНе: в протоколе TCP начали взаимодействовать ученые. Сейчас, уже опираясь и на опыт ИТЭР, мы создали в России свою информационно-коммуникационную платформу,

которая позволяет крупнейшим научным центрам объединиться в общее информационное кольцо и дистанционно участвовать в экспериментах, не посещая установки непосредственно. Если раньше нужно было ехать на установку в лабораторию, иногда в другой регион, то теперь ученые из Новосибирска могут эксплуатировать аппаратуру в Санкт-Петербурге, ученые из Нижнего Новгорода управляют гиротроном в Новосибирске. Это уже новый уровень научных исследований, не поодиночке со своими установками, а эффективный ежесекундный обмен данными, мыслями, версиями. Эффективность научных исследований возрастает многократно.

Еще одно решение, которое будет развиваться и использоваться в программе РТТН Росатома, — сетевое 3D-проектирование. Элементы ИТЭР разрабатываются в ряде стран-участниц, специалисты каждый день вносят изменения по той или другой детали. Конструктор делает изменение, оно получает одобрение в домашнем агентстве страны и немедленно попадает в Международную организацию ИТЭР. Там соответствующий технический офицер оценивает и одобряет решение. Иногда уже на следующий день изменение отражается в базе данных — и физики всей планеты имеют дело с новой конструкцией. У нас в стране уже точно больше 20 точек такого сетевого конструирования для ИТЭР, и эти наработки мы применяем для нашей национальной термоядерной программы.

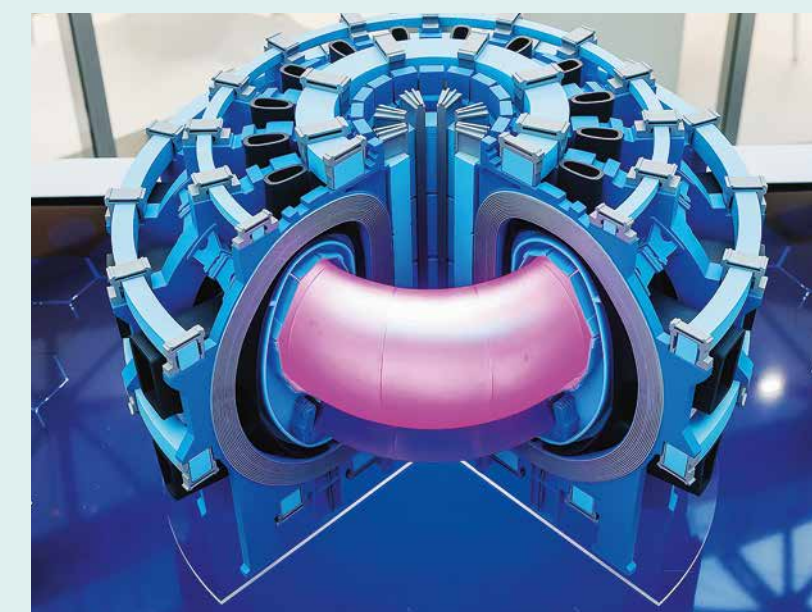
— Если разработки ИТЭР доступны всем участникам проекта, то в чем задачи национальных термоядерных программ, в том числе российской?

— Советский Союз был лидером в термоядерных исследованиях как оборонного, так и гражданского направления, именно эти наработки позволили нам в том числе инициировать проект ИТЭР и сохранять в нем важную роль. Если в момент создания этого проекта страны условно делились на «первый» — капиталистический, «второй» — социалистический и весь остальной — «третий» мир неприсоединившихся стран, то по большому счету сегодня его можно делить на страны ИТЭР и все остальные. И, несмотря на наличие национальных термоядерных программ, членство в этом клубе его участники стремятся сохранять, хотя это требует затрат, как денежных, так и интеллектуальных. Но дело в том, что как раз условие работы, согласно международному соглашению, — это разрешение «использования технологий ИТЭР в национальных программах термоядерных исследований». То есть страны, которые участвуют в проекте ИТЭР, для возможности получения безвозмездного лицензирования технологий должны иметь свои национальные исследовательские программы. Но даже и без формальностей освоение этих технологий, их перенос в физико-техническом смысле на национальную почву возможен, лишь когда страна поддерживает соответствующий уровень образования, науки, индустрии.

Кроме того, прогресс не стоит на месте: появляются новые решения, новые разработки. При том что

## «Связка «участие в ИТЭР + национальная термоядерная программа + активное сотрудничество с партнерами по ИТЭР в их программах» и есть пример умного поведения страны».

толкаем наиболее отработанная, наиболее энергоэффективная технология удержания термоядерной плазмы, каждое из решений, которое опробуется в этом проекте, — это выбор из многих вариантов. Только история покажет, правильный ли делался выбор или надо продолжать поиск. Мы, как и другие страны-партнеры, продолжаем этот поиск. В частности, в рамках национальной программы термоядерных исследований планируем реализовать технологию токамака с реакторными технологиями (РТТ): концептуальный проект готов, эскизное проектирование закончим в 2024 году и в 2025-м начнем рабочее проектирование. Для многих идей ИТЭР можно и нужно пробовать альтернативы, и для этого нужны другие установки. Например, сверхпроводящая машина с ниобий-оловом ( $Nb_3Sn$ ) и ниобий-титаном ( $NbTi$ ) требует охлаждения до экстремально низких температур, именно это порождает ряд сложностей. А за последние несколько лет значительный прогресс достигнут в области высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). В РТТ мы планируем опробовать ВТСП. И это не включено в технологическую платформу ИТЭР, но вполне возможно, будет в будущем термоядерном реакторе. И в этом смысле РТТ — это уже технологический качественный скачок от ИТЭР.



На фото

Международная научная кооперация — важный аспект реализации термоядерных проектов. Вопросы развития термоядерной энергетики в мире обсуждались и на «Атом-экспо-2024»

### Цифра

# 220 тонн

сверхпроводников поставила Россия для ИТЭР

Какие еще качественные изменения мы рассматриваем? Литиевая жидкометаллическая первая стенка: в ИТЭР принято решение с литием не работать, много сложностей. Для ТРТ мы обсуждаем применение литевой первой стенки — технология непростая, но со своими преимуществами. Интересно исследовать методы стационарной (не индуктивной) генерации тока — в ИТЭР определенные методы будут исследоваться, но не все. Вообще, необходимо оценить поведение плазмы в таких объемах, действие различных факторов.

Таким образом, наряду с технологической платформой ИТЭР, которая нам доступна и понятна (благодаря участию в проекте и наличию собственной термоядерной программы), у нас в стране начинает формироваться еще одна, дополнительная технологическая платформа — ТРТ. Используя эти две опоры, уже можно сделать более уверенный шаг к построению реактора. Собственно, связка «участие в ИТЭР + национальная термоядерная программа + активное сотрудничество с партнерами по ИТЭР в их программах» и есть пример умного поведения страны. Поэтому все партнеры сегодня, наряду с участием в ИТЭР, реализуют национальные проекты термоядерных исследований. Кстати, наши китайские друзья, которые стартовали в мирной термоядерной гонке позже других, активно догоняют. Россия помогает в этом: токамак Т-7 из Курчатова института был поставлен в КНР и положил начало термоядерным исследованиям в Китае. Сейчас китайские коллеги очень разгоняются, у них большой бюджет термоядерных исследований, в планах — в 2027–2028 годах построить свой термоядерный реактор. Если в ИТЭР

термоядерная мощность 500 МВт, то Китай проектирует вполне сравнимые 200 МВт.

Китайские партнеры заинтересованы, чтобы наши физики участвовали в их проекте, и нам есть чем дополнить их экономический потенциал (потому что не все определяется деньгами, многое определяется идеями). Но и китайские партнеры тоже занимают сферы деятельности, где могут помочь нам. Здесь представляется очень интересной возможная комбинация, когда две страны, Россия и Китай, могут вместе построить нужные установки, допустим, ТРТ — на высокотемпературных сверхпроводниках и китайскую — на низкотемпературных. Обе стороны найдут, чем дополнить партнера и в строительстве, и в последующих программах исследований. И в этом — тоже опыт совместной работы, международного инвестирования, полученный на ИТЭР. Кстати, ровно об этом говорит Владимир Путин, когда рекомендует приглашать, где это возможно, крупные международные проекты дружественных стран на территорию России. Проект ТРТ — тот самый случай, где не только китайские, но и специалисты многих других стран проявляют интерес к работе.

**— Развивают ли другие страны — участницы ИТЭР свои национальные проекты, альтернативные подходы?**

— Все партнеры имеют свои проекты и концепции в разной степени зрелости. К примеру, европейский проект DEMO должен стать переходным звеном от ИТЭР к коммерческим термоядерным электростанциям. Понятно, что он будет опираться на платформу

и опыт ИТЭР, экспериментального термоядерного реактора. Задача ИТЭР — показать, что мы умеем производить термоядерную энергию и удерживать плазму; DEMO покажет способность преобразования этой энергии в электричество. Все ориентируются на горизонт примерно 2040-х. Мы выбрали ТРТ, опираясь на уникальную ситуацию в нашей стране: у нас большая атомная промышленность, передовой опыт создания и эксплуатации реакторов. Вдобавок нашему обществу не свойственна радиофобия, которая вредит атомной индустрии в ряде даже промышленно развитых стран: остановила развитие в Германии и Италии, существенно сковывает Японию. Наш выбор — гибридный реактор, где термоядерное сердце работает как источник высокоэнергетических нейтронов, которые используются в модулях blankets. Там можно ускоренно нарабатывать из распространенного тория-232 энергетический уран-233 либо из урана-238 — плутоний-239, тоже ядерное топливо. Наличие и ядерной, и термоядерной школ — это колоссальное преимущество и возможность сделать технологический рывок. ТРТ мы видим как машину, которая будет прототипом и для термоядерного реактора, и для термоядерного источника нейтронов для гибридного реактора. Будущее покажет, куда разветвится эта разработка (может быть, разрастется и обе ветви).

**— Как дополнит такая разработка другие амбициозные программы развития атомной энергетики в нашей стране, например «Прорыв»?**

— «Прорыв» — это тоже опция развития технологий, со своими преимуществами и сложностями. Например, быстрые нейтроны из реактора имеют существенно меньшую энергию, чем нейтроны с энергией 14 МэВ в термоядерном источнике. С одной стороны, чем больше энергия нейтронов, тем больше они нарабатывают топлива в blankets. С другой стороны, ядерные реакторы все-таки более простые в инженерно-технологическом смысле установки, они поэтому и были так быстро реализованы, и АЭС построены по всей планете. ИТЭР даже на фоне реакторной установки — фантастически сложная инженерная технологическая задача.

Добавлю, что и концепций термоядерных реакторов тоже много. ИТЭР и ТРТ — токамаки, самая проработанная технология, но есть еще открытые ловушки (ИЯФ им. Г. И. Будкера); есть лазерный термоядерный синтез (ВНИИЭФ), есть стеллараторы, есть пинчи и так далее. Токамаки впереди, потому что показывают много лучшее, иногда раз в сто, коэффициенты эффективности по отношению к другим устройствам, и реактор на этой технологии выглядит наиболее реалистично. Но и американцы на лазерной установке показали выход термоядерной мощности больше, чем был введен в капсулу, хотя КПД всей системы, учитывая внешнее питание, существенно (в 20–30 раз) уступает магнитному термоядерному синтезу. Но все направления надо продолжать, поскольку на данном этапе у нас недостаточно информации. Может оказаться, что завтра какая-нибудь прорывная идея выведет в лидерство стеллараторы. То же может случиться и с топливом: мы

**«Задача ИТЭР — показать, что мы умеем производить термоядерную энергию и удерживать плазму; DEMO покажет способность преобразования этой энергии в электричество».**

ориентируемся на дейтерий-тритиевый эксперимент, а американская компания экспериментирует с синтезом протона и бора-11, получая три альфа-частицы. Есть интерес и к гелию-3, тем более что его можно с Луны доставлять. Поэтому на сегодняшнем этапе нужно дать цвести всем цветам — не потому, что на исследования интересно тратить деньги, и тем более не потому, что физики не хотят работать на результат. Просто пока никто не знает, где именно искомый результат будет наиболее эффективен.

**— Насколько высок энтузиазм работать на этот результат?**

— Среди технологических центров, которые я называл как участников проекта ИТЭР с российской стороны, есть энтузиазм и настрой решить проблему управляемого термоядерного синтеза. Как я упоминал выше, приз виден уже не на столетней шкале, а в масштабе лет примерно десяти — таковы ожидания запуска ИТЭР, Китай собирается в 2028 году запустить свой реактор. Мы тоже говорим, что если будет решение о сооружении ТРТ, то за шесть-восемь лет можно его построить — это обозримый горизонт уже внутри 10 лет.

Понятно, что скептицизм традиционно сопровождает яркие проекты, но это свойство человеческого разума — всерьез воспринимать собственную сферу деятельности, а все остальное оценивать с недоверием. Тем более настолько сложную сущность, как управляемый термоядерный синтез. Но хорошо, что нет таких скептиков, которые бы системно со знаменем и в строю боролись против наших технологий, как, например, против углеводородной или ядерной энергетики. Все страны — участницы ИТЭР едины в том, что термоядерный синтез является единственным возможным перспективным источником энергии для развития человечества. Без термоядерной энергетики невозможно ни освоение дальнего космоса, ни колонизация других планет Солнечной системы, ни даже системное освоение океанского шельфа — это тоже пока непознанный, недоступный мир. Причем источник термоядерной энергии (дейтерий) таков, что за него не нужно вести борьбу, захватывать месторождения. Нет предмета для борьбы за территорию — нужно бороться за технологическое преимущество. Кто технологически развит, тот и впереди.

#### На фото

Катушка полоидального поля PF1 — самый крупный и один из важнейших для будущей установки ИТЭР компонент, разработанный и произведенный в России. Катушка проделала долгий путь из Санкт-Петербурга в Кадараш — на двух судах и специальной транспортной платформе



Текст: Ирина Дорохова  
Фото: НИИЭФА

Прототип высоконагруженной панели первой стенки ИТЭР в процессе подготовки к проведению финальных геометрических измерений в НИИЭФА

# Термоядерное мастерство

В России создают уникальное оборудование для отечественных и международных проектов в области термоядерного синтеза



Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова (НИИЭФА) — ключевая организация в Росатоме, занимающаяся разработками в сфере управляемого термоядерного синтеза. Организованный одновременно с атомным проектом институт почти 70 лет занимается разработкой установок с магнитным удержанием плазмы, в частности токамаков. Постоянно совершенствуемые опыт, научный уровень и производственный потенциал обеспечили НИИЭФА ведущую роль в исполнении российских обязательств по поставкам наукоемкого оборудования международного проекта ИТЭР (Кадараш, Франция) — самого крупного токамака в истории человечества. Рассказываем об основных событиях 2023 года и планах на 2024 год.

## Катушка полоидального поля PF1

Это рекордный по характеристикам для постсоветского пространства сверхпроводниковый соленоид, поставленный Россией на площадку строительства ИТЭР в начале 2023 года. PF1 — одна из шести катушек полоидального поля — часть электромагнитной системы удержания плазмы. Разработанная и изготовленная совместными усилиями НИИЭФА и Средне-Невского судостроительного завода, представившего производственное помещение и возможность использовать технологии и системы качества судовой промышленности, катушка PF1 в полной мере продемонстрировала огромный научный и производственный потенциал России в области магнитных и сверхпроводниковых технологий.

Соленоидальная обмотка катушки собрана из восьми сверхпроводниковых двухслойных двухзаходных галет. Первую из них намотали и успешно испытали еще в 2016 году, последнюю — в 2019-м. Весной

2021 года были завершены сборка и вакуумно-нагнетательная пропитка корпусной изоляции обмотки катушки PF1. После нескольких стадий всесторонних приемо-сдаточных испытаний в ноябре 2022 года катушка была отправлена водным путем в Марсель, а затем специализированным транспортом в Кадараш. Событие стало одним из самых значимых для НИИЭФА в прошлом году, завершив более чем 20-летние усилия нескольких поколений ученых, инженеров, специалистов и рабочих, подтвердивших свою высочайшую квалификацию.

Полномасштабные испытания катушки PF1, а также секций тороидальной обмотки электромагнитной системы ИТЭР в условиях, имитирующих рабочие в части токов до 70 кА при температуре 5 К, запланированы на площадке строительства в рамках мероприятий, цель которых — минимизировать риски сдвига сроков получения первой плазмы. Дирекция ИТЭР запланировала средства и время для подготовки уникального испытательного стенда. В рамках подготовки испытаний ученые и инженеры НИИЭФА в конце 2023 года разработали программу и методику испытаний, а также спецификации испытательного стенда.

В 2024 году специалисты НИИЭФА продолжают работы по технологическому контролю и корректировке разделов технической спецификации криогенных испытаний катушки PF1 и секций тороидальной обмотки электромагнитной системы ИТЭР. Чтобы объединить усилия НИИЭФА и специалистов других стран — участников проекта ИТЭР, была создана рабочая группа, куда вошли представители Международной организации ИТЭР, европейского, японского и российского домашних агентств.

В планах рабочей группы — выполнение аналитических и расчетных работ, цель которых — подтвердить возможность создания условий испытаний, выбора режимов, схем измерения, питания и прочего. По результатам этих работ учеными и инженерами института будут корректироваться и разрабатываться технические требования, программы и методики испытаний.

## Верхние патрубки вакуумной камеры

В НИИЭФА разработали конструкцию верхних патрубков вакуумной камеры установки ИТЭР. На заводе MAN ES под авторским надзором специалистов института в 2023 году завершили изготовление 18 патрубков.

Также в прошлом году специалисты НИИЭФА начали проектирование и изготовление уплотнительных элементов патрубков. В частности, были термообработаны, упакованы и подготовлены к отправке гайки M52 и шайбы M52 из термостойкого сплава Инконель 718, изготовлен комплект деталей (двойные фланцы, заглушки и вставки) для верхних удлинительных патрубков. Комплект обеспечивает установку, юстировку и крепление в верхних удлинительных патрубках порт-плавов при сборке реактора. В 2024 году

изготовление комплекта деталей для верхних удлинительных патрубков продолжится.

## Обращенные к плазме элементы

К обращенным к плазме элементам в термоядерных реакторах-токамаках относятся такие элементы, как панели первой стенки и элементы дивертора, включающие в себя центральные сборки, вертикальные внешние и вертикальные внутренние мишени. В прошлом году НИИЭФА завершил разработку технологии и изготовил первые серийные образцы элементов центральной сборки дивертора.

В настоящее время продолжается изготовление элементов серийных центральныхборок дивертора (ЦСД), которые войдут в первую поставочную партию. Уже изготовлены корпуса из нержавеющей стали, биметаллические крышки, проведена пайка вольфрам-медной облицовки на обращенные к плазме элементы ЦСД, изготовлено 13 крупногабаритных элементов стальной опорной конструкции и другие конструктивные элементы — всего более 800.

Кроме того, завершено изготовление и успешно проведены испытания полномасштабного прототипа панели первой стенки ИТЭР с бериллиевой облицовкой, подготовлен отчет по итогам испытаний, изготовлены два биметаллических полуфабриката крышек пальцев длиной 1200 мм и опытные образцы полуфабрикатов компонентов панелей первой стенки. Выполнена технологическая проработка пальцев восьмой, самой сложной панели первой стенки.

В прошлом году специалисты НИИЭФА провели тепловые испытания обращенных к плазме элементов полномасштабного прототипа внешней вертикальной мишени дивертора ИТЭР производства Японии

## Основные характеристики катушки PF1

Характеристика	Значение
Магнитная индукция, Тл	6,4
Рабочий ток, кА	48
Количество витков	256
Суммарная длина 16 проводников, м	6281
Количество контактных соединений	15
Сопротивление контактных соединений, нОм	2–4
Масса, т	161
Внешний диаметр, мм	8889
Внутренний диаметр, мм	6818
Высота (без терминала), мм	991



**Вклад России в ИТЭР**

— катушка полоидального поля PF1 (100% — вклад НИИЭФА);

— сверхпроводник для катушек тороидального и полоидального полей;

— гиротроны;

— устройство коммутации тока и вывода энергии, силовые цепи (100% — вклад НИИЭФА);

— стенды для испытаний порт-плагов;

— системы диагностики для измерения параметров плазмы;

— верхние патрубки вакуумной камеры (100% — вклад НИИЭФА);

— панели первой стенки (40% — вклад НИИЭФА);

— центральные сборки дивертора (100% — вклад НИИЭФА);

— тепловые испытания элементов дивертора (100% — вклад НИИЭФА);

— разработка диагностик двух нижних, двух верхних и экваториального портов.

**В общей сложности Россия отвечает за изготовление и поставку на ИТЭР 25 систем.**

**Словарь термоядерщика**

**Дивертор** — устройство в термоядерном реакторе для удаления внешних слоев плазменного шнура и удаления примесей с периферии плазмы.

**Палец** — это сложная многослойная конструкция из бериллиевых кубиков 16 x 16 мм, напаянных на медно-хром-циркониевую бронзу, которая соединена со стальной основой диффузионной сваркой.

**Порт-плаги** — диагностические модули для измерения параметров горения плазмы.

**Сепаратриса** — замкнутая магнитная поверхность, которой плазма вблизи стенки делится на две принципиально разные зоны.

**Юстировка** — комплекс операций по приведению меры или измерительного прибора в состояние, обеспечивающее должную точность и надежность их действия. Она заключается в установлении правильного взаимодействия, взаимного расположения и относительного перемещения деталей, узлов и систем юстируемых объектов.

и тепловые испытания обращенных к плазме элементов полномасштабного прототипа внутренней вертикальной мишени дивертора ИТЭР производства Европейского союза. Испытания были проведены на уникальном российском стенде IDTF (ITER Divertor Test Facility). Оба прототипа успешно выдержали испытания, которые включали в себя более 36 000 циклов при тепловых нагрузках от 5 до 20 МВт/м<sup>2</sup>.

В 2023 году стартовала разработка системы управления вакуумными печами для участка индукционной пайки облицовки элементов панелей первой стенки ИТЭР. Облицовка припаивается на бронзовое основание в вакуумной печи высокочастотным индукционным способом.

В этом году ученые АО «НИИЭФА» заняты изготовлением и тестированием опытных образцов биметаллических полуфабрикатов пальцев панели первой стенки, изготовлением обращенных к плазме элементов и коллекторов стальных опорных конструкций центральных сборок дивертора и испытанием мощными тепловыми потоками обращенных к плазме элементов центральных сборок дивертора ИТЭР (их поставляет Россия) и внешних вертикальных мишеней дивертора, которые поставляет Япония.

**Устройства коммутации тока и вывода энергии, силовых цепей**

Россия отвечает за самую дорогостоящую и одну из самых сложных в изготовлении систем — коммутационную аппаратуру, шинопроводы и энергопоглощающие резисторы для электропитания и защиты сверхпроводниковой электромагнитной системы реактора ИТЭР.

Для этой системы НИИЭФА разрабатывает и изготавливает все силовые компоненты систем электропитания токамака, расположенных между выводами AC/DC-преобразователей и фидерами сверхпроводниковых катушек. В число этих компонентов входит уникальная коммутационная аппаратура постоянного тока, обеспечивающая оперативные переключения токов в системах электропитания сверхпроводниковых катушек и защитный вывод энергии, накопленной в магнитном поле катушек, при аварии. Вторая важная составляющая — энергопоглощающие резисторы и элементы системы принудительного охлаждения резисторов. Первые нужны для рассеивания колоссальной энергии (суммарно более 50 ГДж), запасенной в магнитном поле катушек. Главная функция вторых — вывести эту энергию из секции резисторов системы оперативного вывода энергии, если из-за аварии сверхпроводящие свойства будут утрачены. Третья составляющая — сильноточные и высоковольтные токоведущие шины, которые подводят мощности от AC/DC-преобразователей к сверхпроводниковым катушкам, а также опоры для их установки. Четвертая составляющая — компоненты для сборки коммутационных аппаратов в здании диагностики.

В 2023 году, несмотря на санкционное давление и ограничительные меры, введенные против России,

**На фото**

Прототип генератора импульсов инициирования высоковольтных электродетонаторов — важного компонента системы защиты ИТЭР от повреждений — в процессе испытаний в климатической камере в НИИЭФА

НИИЭФА в четыре этапа отправил на строительную площадку в Кадараш 24 трейлера общим весом более 282 тонн.

В 2024 году изготовление, испытание и подготовка к отправке коммутационной аппаратуры, энергопоглощающих резисторов, шинопроводов и контрольно-измерительной аппаратуры для систем электропитания обмоток магнитной системы ИТЭР продолжатся.

**Термоядерные проекты в России и других странах**

НИИЭФА разрабатывает, изготавливает и испытывает уникальное оборудование не только для ИТЭР, но и для российских мегасайенс-проектов в области термоядерного синтеза. Ученые института участвуют в создании токамака T-15MD, который строится в Курчатовском институте, установки «Глобус-3» в ФТИ им. А. Ф. Иоффе и токамака с реакторными технологиями (РТТ).

Для T-15MD ученые НИИЭФА разработали концептуальный проект системы ионно-циклотронного нагрева токамака. В этом году они разрабатывают эскизный проект этой системы.

Специалисты НИИЭФА участвовали в создании «Глобуса-М» (запущен в 1999 году) и «Глобуса-М2» (в 2018 году). Оба — сферические токамаки, чьи параметры позволяют ставить эксперименты и получать результаты мирового уровня. Теперь ученые НИИЭФА и ФТИ проводят исследование, нацеленные на определение инженерно-физических параметров компактного токамака с малым аспектным отношением (отношением радиусов тора) «Глобус-3». Это водородный прототип термоядерного источника нейтронов.

В прошлом году ученые НИИЭФА разработали предварительную конструкцию электромагнитной системы и тепловых экранов РТТ, его пневмогидравлическую схему и конструктивное исполнение гелиевых коммуникаций, актуализировали конструкцию криостата и определили технические требования к системе криогенного обеспечения. Также в институте разработали предварительную компоновку систем РТТ и конструкцию панелей первой стенки на внутреннем обходе тора и встроенных катушек для качания сепаратрисы. Результаты этих работ позволят завершить в этом году эскизный проект РТТ.

НИИЭФА участвует не только в российских, но и в зарубежных проектах. Один из них — создание материаловедческого токамака КТМ в Казахстане. В прошлом году ученые института сделали расчеты и разработали конструкцию эквивалента плазменной нагрузки для системы дополнительного высокочастотного нагрева плазмы и провели расчеты в поддержку экспериментальной программы КТМ.

В частности, были скорректированы параметры настроек регуляторов токов в обмотках и параметры программного блока измерения тока и положения плазмы, сформулированы требования и рекомендации



для повышения точности измерения параметров электромагнитного поля и плазмы, калибровки измерительных каналов электромагнитной диагностики КТМ. Также был разработан контур быстрого управления вертикальным положением плазмы токамака КТМ, включая синтез линейной математической модели объекта управления и синтез регулятора вертикального положения плазмы, проведены модельные исследования контура быстрого управления вертикальным положением плазмы и выполнены прочие работы.

Кроме того, защитные размыкатели для устройств быстрого вывода энергии из сверхпроводниковых обмоток магнитной системы, произведенные НИИЭФА, работают в японском токамаке JT-60SA. Первая плазма на нем была получена в октябре прошлого года, пока это крупнейший в мире экспериментальный термоядерный реактор.

**Справка**

**РТТ** — это полномасштабный прототип термоядерного реактора, который должен продемонстрировать успешность отечественных термоядерных технологий. Магнитное поле в нем будет достигать 8 Тл — это технологический предел известных на сегодняшний день конструкционных материалов. В установке будут предусмотрены экспериментальные модули по конвертации энергии токамака в тепловую и электрическую. РТТ создается в рамках Комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации» (КП «РТТН»).

# Троицкая пятерка

Современные термоядерные проекты ГНЦ РФ ТРИНИТИ

**Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ) — один из ключевых научных центров в области магнитного удержания плазмы и инерциального термоядерного синтеза. Перед вами пять самых ярких проектов ученых из Троицка по версии «Вестника атомпрома».**

## 1. Под защитой лития

Троицкий токамак T-11M — одна из трех действующих установок магнитного удержания плазмы в стране. Установка небольшая, параметры по современным меркам скромные: ток в плазме 0,1 МА, температура плазмы 400–600 эВ, плотность плазмы  $7 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Эти параметры обеспечивают возможность исследования взаимодействия плазмы с первой стенкой токамака.

На токамаке отработывают технологии для перспективных термоядерных установок. Ведутся исследования ионно-циклотронного нагрева плазмы, изучение динамики срыва разряда, отработка новых диагностик плазмы, исследования материалов первой стенки и разработка методов ее защиты.

В частности, на T-11M разрабатывают жидкую литиевую защиту для токамаков. Одна из самых сложных проблем при попытках создания термоядерного реактора — проблема первой стенки, которая взаимодействует с плазмой. В международном проекте токамака ИТЭР ставка сделана на максимально термостойкий материал — вольфрам. На более отдаленную перспективу ученые придумали защищать наиболее нагруженные элементы стенки слоем жидкого или газообразного лития, таким образом купируя приходящие из плазмы потоки частиц, снижая тепловую нагрузку на стенку.

В 2022 году ученым ГНЦ РФ ТРИНИТИ удалось осуществить внешнюю дозакровку эмиттерной системы T-11M литием без нарушения вакуумных условий в рабочей камере. Это результат мирового уровня. До конца 2024 года планируется разработать и испытать полный набор систем и технологий литиевой защиты первой стенки термоядерного реактора. В частности, будут созданы и испытаны перспективные устройства и технологии для токамака: лимитер, коллектор, инжектор, элемент литиевого дивертора. Эти литиевые устройства и технологии смогут работать в квазистационарном режиме (более

10 с) при тепловой нагрузке до  $10 \text{ МВт/м}^2$  с внешней подпиткой литием.

## 2. На пути к промышленному реактору

К 2030 году в ГНЦ РФ ТРИНИТИ хотят создать экспериментальную установку управляемого термоядерного синтеза нового поколения — токамак с реакторными технологиями (ТРТ). ТРТ должен стать ключевым шагом на пути к коммерческой термоядерной энергетике. Он призван совместить уже имеющиеся достижения в удержании высокотемпературной плазмы с практической отработкой технологий, необходимых для создания энергетического термоядерного реактора.

ТРТ нужен для исследований квазистационарных физических процессов в обоснование опытного термоядерного реактора, изучения поведения плазмы в режимах, близких к зажиганию, отработки различных методов дополнительного нагрева плазмы, разработки диагностик в больших нейтронных потоках. Сейчас идет эскизное проектирование ТРТ и его элементов: вакуумной камеры, магнитной системы, оболочки криостата и т. д.

Токамак будет буквально напичкан новациями. Магнитную систему хотят целиком сделать из высокотемпературного сверхпроводника второго поколения. Такие сверхпроводники способны работать в очень сильных электромагнитных полях. По этому показателю оборудование для ТРТ будет превосходить даже те устройства, которые уже созданы для международного проекта термоядерного экспериментального реактора ИТЭР. Если индукция магнитного поля ИТЭР будет составлять около 5,3 Тл, то в ТРТ этот показатель дойдет уже до 8 Тл. При этом российская установка будет более компактной и, соответственно, более дешевой.

Плазма в ТРТ сможет разогреваться до температур, рекордных для токамаков таких размеров. Для этого российскую установку оснастят высокоэффективными гиروتронами (источниками мощного СВЧ-излучения) мегаваттного диапазона, разрабатываемыми в Институте прикладной физики РАН. Их частота составит 220 ГГц, что соответствует тороидальному магнитному полю токамака. В ИТЭР применяются гиروتроны на 170 ГГц. А также оснастят системами дополнительного нагрева в виде нейтральной инъекции и ИЦР (система ионно-циклотронного нагрева).

Первую стенку ТРТ планируется обеспечить литиевой защитой, будет реализована возможность широкого

управления профилями параметров плазменного шнура.

Параллельно в ГНЦ РФ ТРИНИТИ готовят площадку под строительство. Новую установку построят на базе комплекса ТСП (токамак с сильным полем), сооруженного в 1980-х годах. Комплекс включает четыре ударных генератора с маховиками — их решено не менять, а модернизировать и использовать как один из вариантов источника питания будущего токамака. Первый этап реконструкции ТСП планируется завершить к концу этого года.

## 3. Инерциальный вариант

Высока вероятность того, что первый коммерческий термоядерный реактор будет токамаком — это наиболее проработанная концепция. Однако ряд ученых делают ставку на инерциальный, в частности лазерный, термоядерный синтез (ЛТС). Принцип ЛТС — в поджиге (микровзрыве) путем обжата лазерным излучением термоядерной мишени за время, меньшее времени ее разлета. ГНЦ РФ ТРИНИТИ совместно с РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывают макет модуля драйвера для лазерного термоядерного синтеза.

Создан стенд для изучения физических процессов и явлений, возникающих при диодной накачке и активном газовом криогенном охлаждении. Это уникальный инструмент, позволяющий моделировать и испытывать сложные лазерные схемы и отрабатывать различные подсистемы: установки криогенного охлаждения, удаленной диодной накачки и др. Все комплектующие стенда — российского производства, при этом он не уступает лучшим мировым аналогам. Один из экспериментов на стенде в 2021 году дал неожиданный результат: ученые смогли усилить лазерный импульс до значений, существенно превышающих ожидаемые. К концу 2024 года институт должен представить экспериментальные образцы усиленного модуля килоджоульного класса, способного работать на частоте 10 Гц, с диодной накачкой и системой криогенного охлаждения.

В ГНЦ РФ ТРИНИТИ функционирует один из крупнейших в мире генераторов сверхмощных (до 12 ТВт) электрических импульсов — экспериментальный электрофизический мегаамперный комплекс «Ангара-5-1». Он был введен в эксплуатацию еще в 1984 году, но до сих пор остается важной экспериментальной установкой для исследования физики быстрых самосжатых разрядов сверхтераваттной мощности, динамики излучающей плазмы многозарядных ионов, проблем инерциального управляемого синтеза.

## 4. Проверка плазмой

Для испытаний конструкционных материалов и отдельных элементов перспективных термоядерных

реакторов в ГНЦ РФ ТРИНИТИ создают источник термоядерных нейтронов мегаэлектронвольтового диапазона. Основа установки — два плазменных ускорителя, стреляющие сгустками плазмы навстречу друг другу. В результате столкновения происходят реакции ядерного синтеза с выходом высокоэнергетичных нейтронов.

В рамках проекта создан новый мощный импульсный ускоритель плазмы, конденсаторный накопитель для его питания, а также комплекс плазменной диагностики. Разработан экспериментальный образец мощного источника нейтронов. Также созданы экспериментальный стенд для измерений параметров плазменных сгустков, генерируемых лабораторным образцом плазменного ускорителя, и комплекс диагностических средств.

## 5. Плазма в космосе

К 2024 году ГНЦ РФ ТРИНИТИ планирует создать лабораторный прототип ракетного двигателя на базе квазистационарного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем. Космические корабли с такими двигателями будут осваивать дальний космос.

Современные ракеты летают на химических двигателях, требующих больших объемов топлива. Дальние космические перелеты с их помощью практически невозможны — потребуются большие запасы горючего. Проблему решит плазменный двигатель, обладающий существенно более высоким удельным импульсом и требующий меньших объемов топлива.

Сейчас плазменные двигатели применяются исключительно для маневрирования: они слишком маленькие и недостаточно мощные для того, чтобы использоваться в качестве маршевых. Для решения этой проблемы в НИЦ «Курчатовский институт», ГНЦ РФ ТРИНИТИ и ГНЦ «Центр Келдыша» разрабатывают электрореактивные двигатели на базе плазменных технологий.

Курчатовский институт отвечает за разработку мощного безэлектродного плазменного ракетного двигателя. В ГНЦ «Центр Келдыша» создают модули электрореактивного ракетного аппарата на базе холловского и ионного двигателей нового поколения. А в ГНЦ РФ ТРИНИТИ — прототип плазменного ракетного двигателя с повышенными параметрами тяги и удельного импульса на базе магнитолазменного ускорителя, позволяющего эффективно использовать мощность источника энергии. В 2021 году на квазистационарном плазменном ускорителе в ГНЦ РФ ТРИНИТИ разработчики продемонстрировали удельный импульс выше 100 км/с для водородной плазмы в режиме однократных импульсов. При переходе в частотный режим работы прототип плазменного ракетного двигателя на базе магнитолазменного ускорителя будет иметь тяговую мощность в 300 кВт при КПД выше 60%.

Текст: Ольга Ганжур

Фото: АО «Наука и инновации», газета «Страна Росатом» / Алексей Башкиров

# Термояд сегодня, завтра и послезавтра

Ученые обсудили результаты актуальных исследований в области управляемого термоядерного синтеза



**В Звенигороде с 18 по 22 марта прошла 51-я Международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. В мероприятии только очно зарегистрировалось около 500 человек, более 300 подключались онлайн.**

«Сегодня возможность практического использования управляемого термоядерного синтеза в энергетике выглядит реальной перспективой», — отметил в обращении к участникам конференции глава Росатома Алексей Лихачев. — Рубеж 50–60-х годов текущего столетия закреплен в качестве опорной даты сооружения демонстрационного термоядерного реактора в национальных программах ряда стран — наших партнеров по международному проекту ИТЭР».

Росатом работает над федеральным проектом по термоядерным и плазменным технологиям в составе

Комплексной программы «Развитие атомной науки, техники и технологий» (КП «РТТН»). «Ключевыми элементами нашей программы являются создание токамака с реакторными технологиями, в который мы планируем интегрировать современные научно-технологические решения, а также вывод на рабочие параметры токамака Т-15МД в Курчатовском институте», — подчеркнул Алексей Лихачев. — Рассчитываем, что оба эти объекта, равно как и реализация проекта ИТЭР, станут основой тесной международной кооперации в интересах развития мировой науки».

## Курчатовский вклад

С открывающим докладом выступил президент НИЦ «Курчатовский институт» Михаил Ковальчук. Он подробно рассказал об атомных и неатомных проектах, которые реализует сегодня Курчатовский институт, в том числе в сотрудничестве с Росатомом. Термояд, по его мнению, должен стать важной составляющей природоподобной энергетики будущего, ведь он

воспроизводит процессы, протекающие в звездах. При этом в структуре земной энергетики термоядерный источник нейтронов производит топливо для быстрых и тепловых ядерных реакторов — основных наработчиков энергии. А долгоживущие радиоактивные элементы эффективно дожигаются в жидкосольевом реакторе, так что возвращаемые в природу отходы топливного цикла по уровню радиоактивности соответствуют исходно добытому сырью, не нарушая природный баланс.

О результатах первых экспериментов на новом токамаке Т-15МД рассказал научный руководитель комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт» Петр Хвостенко. Он напомнил, что в марте прошлого года на установке получили первую высокотемпературную плазму. Всего за прошлый год провели две экспериментальные кампании, в ходе которых отработали алгоритмы получения плазменных разрядов, достигли параметров магнитного поля индукцией 1 Тл с длительностью 30 секунд. Провели стендовые испытания по выводу гиротрона предьонизации на номинальные параметры, а также получили в ФМБА разрешение на проведение экспериментов сроком на 5 лет. «В ходе экспериментов были получены плазменные разряды с током до 260 кА», — сообщил Петр Хвостенко. — При токе плазмы 190 кА достигнута рекордная для отечественных токамаков длительность импульса — 2 секунды. В дальнейшем планируется ввод в работу систем дополнительного нагрева плазмы и поддержания тока, дооснащение токамака диагностикой, установка дивертора и облицовка камеры графитом».

«Это очень хороший результат для пусковой работы, и ясно, что токамак будет работать нормально», — прокомментировал директор направления научно-технических исследований и разработок Росатома, научный руководитель федерального проекта «Термоядерные и плазменные технологии» КП «РТТН», вице-председатель международного Совета ИТЭР Виктор Ильгисонис.

Он также оценил ход реализации термоядерного проекта РТТН: «Термоядерные исследования основаны на сложных наукоемких технологиях, которые надо из области идей перевести в практическую плоскость. Мы составили напряженный многоплановый график реализации проекта. Главным результатом считаем то, что все наши работы идут по плану. Мы идем без существенных отклонений, и это очень важно».

## 85 процентов ИТЭР

Новостями со стройплощадки международного экспериментального термоядерного реактора поделился заместитель генерального директора Международной организации ИТЭР Ютака Камада. По его словам, установка собрана на 85%, но есть проблемы.

«Реализация проекта ИТЭР сталкивается с многочисленными задержками в сборке токамака

из-за несвоевременной поставки узлов и компонентов, более продолжительной, чем ожидалось, сборки первых в своем роде систем, а также из-за необходимости доработки элементов вакуумной камеры и тепловой защиты», — сказал Ютака Камада. — Текущая ситуация с поставкой компонентов и внимательная оценка процессов сборки демонстрируют необходимость принятия технически реализуемого плана проекта с минимизацией рисков». Он напомнил, что руководство ИТЭР сейчас готовит новый график проекта (так называемую «базовую линию»). Предполагается, что его обсудят и утвердят на Совете ИТЭР в июне этого года.

По словам заместителя гендиректора Международной организации ИТЭР, идет сборка вакуумной камеры реактора. Уже установлено большинство внутрикамерных узлов и компонентов, необходимых для получения первой плазмы, — кроме первой стенки. Ее изначально планировали делать из бериллия, но буквально в прошлом году в Международной организации ИТЭР решили заменить инерционно охлаждаемой стенкой из вольфрама. Однако «остаются сомнения в совместимости вольфрама с плазмой». Моделирование показало, что попадание вольфрамовых примесей в плазму, способное повлиять на работу реактора, можно исключить, но нужно экспериментальное подтверждение. Программу экспериментов поручено подготовить Международной рабочей группе по физике токамаков.

«Международная организация ИТЭР и Проектный центр ИТЭР (Росатом) обсуждают программу исследований по возможности нанесения покрытий из В<sub>4</sub>С на вольфрам в качестве способа снижения риска попадания вольфрамовых примесей в плазму», — рассказал Ютака Камада. — Разработки, проведенные в рамках проекта ИТЭР, позволяют наносить такие покрытия толщиной 0,1–20 микрон разными способами».

Инициативные исследования покрытий в нашей стране идут уже почти год, рассказал корреспонденту «Вестника атомпрома» руководитель ИТЭР-Центра Анатолий Красильников. Рассматривают не только В<sub>4</sub>С, но и другие варианты покрытий, в частности TiV<sub>2</sub>AlN. «Мы уже изготовили и испытали первую партию образцов под нагрузками, подобными тем, которые будут в токамаке. Результатам этих испытаний почти полностью посвящен первый номер журнала «Вопросы атомной науки и техники» за этот год», — отметил он. — Международная организация ИТЭР подготовила контракт с Россией на эту тему. Это означает, что необходимость исследований признана и в ИТЭР готовы тратить на них деньги. Изготовлена вторая партия образцов. В этом году или в начале следующего запланированы испытания на токамаках в Корее и Китае».

## Шаг к реактору

Отечественный шаг на пути к термоядерной энергетике — токамак с реакторными технологиями (РТТ). «Эта машина имеет ряд принципиальных

новшеств, — отметил Анатолий Красильников. — Прежде всего, электромагнитную систему впервые сделаем из высокотемпературных сверхпроводников. Это позволит поднять магнитное поле до 8 Тл, увеличить параметры плазмы и уменьшить масштабы установки».

Ученый подчеркнул, что специалисты по токамакам пока не решили проблему генерации стационарного тока, которая необходима для поддержания термоядерного горения плазмы. «На ТРТ мы будем исследовать несколько методов, — сказал Анатолий Красильников. — Нейтральной инжекцией занимается Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН, электронно-циклотронным нагревом — нижегородский Институт прикладной физики РАН, нижегибридными волнами — петербургский Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН».

Еще одна задача, пока не решенная термоядерщиками, — создание стационарного (длительностью от 100 секунд) разряда. Это важно для правильного взаимодействия плазмы со стенкой. «Мы будем отрабатывать на этой машине и новые материалы для первой стенки дивертора, и новые конструкции первой стенки и дивертора, — продолжает глава ИТЭР-Центра. — Кроме того, мы будем отрабатывать еще и плазменные технологии, которые будут продлевать жизнь первой стенке и дивертору».

Строить ТРТ планируют на территории Троицкого института инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ). «Первого марта генеральный директор Росатома подписал указ о старте работ

по токамаку с реакторными технологиями. Статус проекта теперь официально закреплен на отраслевом уровне, — рассказал гендиректор института Кирилл Ильин. — Эскизный проект установки разработывает НИИ электрофизики и автоматизации (НИИЭФА им. Д. В. Ефремова. — Прим. ред.), в этом году он уже должен быть готов. Это будет основа для формирования технического проекта в будущем. Параллельно на базе ТРИНИТИ создается инфраструктура будущего токамака, до конца года ее важные компоненты будут готовы в своей инженерной части. Начало работ по реконструкции с размещением токамака планируем на 2026 год, физпуск — на 2030-й».

По мнению директора ИТЭР-Центра Анатолия Красильникова, российские и китайские термоядерщики должны работать над токамаками будущего в тесном сотрудничестве. Китайцы должны помогать нам в создании ТРТ, а нам стоит принять участие в проекте китайского токамака BEST, а потом проводить друг у друга в гостях исследования, уверен ученый. Вместе ТРТ и BEST составят отличную базу для отработки термоядерных технологий будущего.

«Нынешнюю звенигородскую конференцию впервые посетили наши китайские коллеги из Института физики плазмы Китайской академии наук, — отметил Анатолий Красильников. — Совсем недавно мы подписали двустороннее соглашение о сотрудничестве, уверен, оно принесет очень достойный результат. Я рад, что в этом году наша традиционная конференция стала платформой для такого тесного международного сотрудничества, и нет сомнений, что наше дальнейшее взаимодействие пойдет на пользу национальным термоядерным программам России и Китая».

## Путь для будущих ученых

Мы попросили ученых и организаторов исследований в области УТС ответить на вопрос, стоит ли современным школьникам и студентам идти учиться на термоядерщиков.



**Анатолий Красильников**

Директор Частного учреждения «ИТЭР-Центр»

— Наше поколение строит международный термоядерный реактор ИТЭР, чтобы следующее поколение получило возможность на нем заниматься фундаментальной физикой. Современным школьникам открыта дорога на ИТЭР. Наша страна — полноценный участник

проекта, мы вносим 10% вклада на этапе сооружения, поэтому минимум 10% наших физиков должны будут работать там. ИТЭР — колоссальный праздник жизни для будущих ученых. Термоядерная физика — очень многозадачная наука, дает простор для творчества максимальный.

Там и волны, и плазма, и корпускулы, и гидродинамика, и газодинамика... Каким бы явлением в физике ученый ни интересовался, он запросто может реализовать в термоядерных исследованиях. Пойти в термояд — это будет правильное решение.



**Кирилл Ильин**

Генеральный директор ГНЦ РФ ТРИНИТИ

— Люди, которые будут эксплуатировать строящийся токамак с реакторными технологиями, сейчас учатся в восьмом классе. Мы уже сотрудничаем со школами Троицка и будем развивать эту

кооперацию на все города — участники проекта ТРТ: Новосибирск, Нижний Новгород, Санкт-Петербург. Мы погружаем школьников в программу термоядерных исследований: они учатся

моделировать эксперименты. На ТРТ термоядерные исследования не закончатся. Есть задача создания термоядерной энергетики. Так что работы на всех хватит.



**Виктор Ильгисонис**

Директор направления научно-технических исследований и разработок Росатома, научный руководитель федерального проекта «Термоядерные и плазменные технологии»

— У термоядерных исследований и термоядерной энергетики большое будущее в нашей стране, специалисты в этих областях будут востребованы. Я призываю Министерство науки и высшего образования активно подключаться к процессу их подготовки. Ведь

чтобы подготовить хорошего ученого, который будет добросовестно и продуктивно работать в науке, нужно не меньше десятка лет. Мы бы предпочли, чтобы университеты «бежали» с образовательными программами впереди нас, а пока они, напротив, несколько отстают.

С вузами мы работаем постоянно, но все же они ориентируются на те задачи, которые ставит им Министерство науки и высшего образования, и на собственные интересы. Важно, чтобы в университетах уже сейчас знали о наших задачах.

### На фото

Токамак Т-15МД (НИЦ «Курчатовский институт»). В ходе экспериментов в 2023 году на установке была достигнута рекордная для отечественных токамаков длительность импульса — 2 секунды (при токе плазмы 190 кА)



# От физики к технологиям

Решения, которые появляются в работах по УТС, могут быть востребованы в самых разных областях

**Сергей Коновалов возглавляет отдел теории плазмы Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий. «Вестник атомпрома» обсудил с ученым будущее термояда, последние успешные эксперименты в области управляемого термоядерного синтеза, конкуренцию государств в этой области и успешность частных инвестиций.**

— Сергей Владимирович, разговоры о будущем термоядерной энергетики наталкиваются на предсказуемый скепсис: мол, «еще через 20 или 30 лет». Но одна из главных научных новостей прошлого года — про то, как ученые из Ливерморской национальной лаборатории в США добились чистого прироста энергии в реакции термоядерного синтеза. Как вы относитесь к результатам эксперимента?

— Это действительно серьезное достижение. Но этот способ осуществления реакции синтеза вряд ли представляет интерес в смысле энергетики будущего. Их лазерный комплекс обеспечивает не более одного «выстрела» в сутки. При таком способе происходит сжатие очень маленькой сферической мишени с радиусом около 1–2 мм и массой около нескольких миллиграммов. Стоит где-то передавить, и вместо сжатой мишени будет «плевок» куда-то в сторону, больше ничего.

— То есть токамаки остаются более перспективной технологией на исследовательском уровне?

— Давайте считать. Самое большое превышение выработанной энергии над подводенной было, по-видимому, на JET (Joint European Torus — Объединенный европейский токамак), это чуть меньше единицы. В рекордном разряде JET в прошлом году было выработано порядка 69 МДж за импульс длительностью около 5 секунд. Количество термоядерной энергии, выделенной в разряде JET, превышает результат Ливерморской лаборатории.

Нужно также отметить, что в оценке КПД термоядерного устройства используется сравнение мощности, введенной в плазму (в случае токамака) или в мишень (в лазерном эксперименте Ливерморской лаборатории), с произведенной мощностью реакций синтеза. Но реально мощности, затрачиваемые на создание условий зажигания термоядерных реакций, значительно превышают указанную введенную мощность. Если мы посмотрим на ИТЭР, то там только системы охлаждения требуют примерно 35 МВт от сети.

А к этому еще добавляются системы дополнительного нагрева, генерации тока и многие другие. Для ливерморского эксперимента КПД лазеров находится на уровне нескольких процентов, так что здесь ситуация, по-видимому, еще более напряженная. Чтобы устройство было энергетически выгодным, вот это превышение термоядерной мощности над подводенной должно быть 50-кратным и выше. С точки зрения физики эта проблема решаема, а вот технических проблем слишком много. В ИТЭР практически каждая из систем — на грани существующих технологий или за гранью. И хотя степень проработки технических решений по ключевым системам ИТЭР, с моей точки зрения, гарантирует в конечном итоге успех и осуществление основных миссий проекта, сколько времени займет ввод в эксплуатацию и выход на реакторные режимы столь сложной машины с многопараметрическим управлением, сейчас сказать трудно.

— Если говорить о неофициальном международном соревновании в области технологий управляемого термоядерного синтеза, можно ли сегодня предполагать, какая страна сможет добиться необходимых результатов быстрее всего?

— Знаете, 10 лет назад я бы удивился своим словам, но сейчас могу точно утверждать, что Китай вырвется вперед с космической скоростью. И тут вопрос не только в деньгах, а еще и в том, сколько людей работают над темой. Сейчас Китай подготавливает около тысячи специалистов в термоядерной энергетике в год. Плюс китайцы обеспечили очень достойный уровень жизни своим ученым, многие ранее уехавшие ученые вернулись работать на родину, принеся с собой опыт и знания, полученные в работе на крупнейших термоядерных установках мира. Очень заметно вырос уровень квалификации молодых специалистов.

— Раз китайцы впереди планеты всей, чем они удивят мир?

— Китайцы уже строят и в 2027 году собираются ввести в эксплуатацию в Институте физики плазмы Китайской академии наук (ASIPP) новый крупный сверхпроводящий токамак BEST (Burning Experiment Superconducting Tokamak), который будет работать с дейтерий-третиевой плазмой. Там они планируют получать от 20 до 200 МВт термоядерной мощности. По тому, как они подошли к подготовке проекта, есть ощущение, что он реализуем. Но не уверен, что уложатся в сроки, системы очень сложные, а на стендах все проверить невозможно. Токмаки ведь это не изделия с конвейера, все установки индивидуальные. Это в том числе означает,

что успешный эксперимент на одном токамаке не воспроизводится на других, а, скорее, задает направление поиска «правильного» режима разряда.

Более того, китайцы занимаются не только физикой, но и сразу технологией. В ASIPP, где сейчас устанавливает рекорд за рекордом сверхпроводящий токамак EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak), уже создали стендовую площадку CRAFT (Comprehensive Research Facility for Fusion Technology), где можно тестировать и отрабатывать технологии производства сверхпроводниковой электромагнитной системы, систем дополнительного нагрева и прочего. Задействованы массы технологий.

— Получается, что для реализации грандиозных планов нужны значительные госсредства, как в Китае?

— В нашем случае, безусловно, да, но в мировом термояде есть убедительные примеры того, что частные деньги работают лучше, существенно быстрее. Я не финансист и уж тем более не инвестор, но хорошо известно, что рискованные вложения обязательно составляют некую часть портфеля ценных бумаг, поэтому и в проекты из сферы термояда тоже активно вкладываются. В ту же американскую компанию Commonwealth Fusion Systems, которая сейчас строит токамак SPARC с магнитной системой из высокотемпературных сверхпроводников, вложены миллионы частных денег, а господдержка осуществляется скорее на «моральном» уровне. Если нужно что-то купить, они просто идут и покупают, а потом уже объясняют инвесторам, на что это потрачено.

— Что скажете об их проекте?

— Компания намерена реализовать преимущества высокого магнитного поля в токамаке для возрастания интенсивности термоядерных реакций, что позволит получать высокие мощности в установках гораздо меньшего размера (а значит, и стоимости), чем ИТЭР. Ключевой технологией для повышения величины магнитного поля является переход на высокотемпературные сверхпроводящие (ВТСП) проводники в электромагнитной системе токамака. Сейчас, насколько мне известно, компания получила финансирование на сооружение пилотного токамака SPARC, с использованием опыта которого должен быть спроектирован прототип коммерческого токамака реактора ARC (affordable, robust, compact — «доступный, надежный, компактный»). SPARC будет использовать ВТСП-магниты на основе оксида иттрия-бария-меди. Эти магниты помогут создавать примерно вдвое большие магнитные поля по сравнению с низкотемпературными.

— Некоторые стартапы из сферы термояда объявляют, что эта технология также может найти применение для космических и судовых двигателей, прочих промышленных задач. На ваш взгляд, это реально?

— Не могу ничего сказать в пользу двигателя. Да и зачем? Те же космические плазменные двигатели хорошо

известны, и сейчас их много работает, в Росатоме проводится много исследований. Но это не термояд, это не реакции синтеза, это не энергетика. Сделать энергетическую установку термоядерную? Тут ведь штука какая, как со слоном. Он на единицу веса ест меньше синицы, потому что тепловыделение зависит от объема, а потери тепла — от площади поверхности. Поэтому большая машина дает возможность держать характеристики плазмы очень хорошо. Сделать ее меньше — значит не обеспечить изоляцию. К тому же установки с магнитным удержанием плазмы, такие как токамак, на сегодняшний день существенным образом ориентированы на использование громоздких и энергоемких дополнительных систем. Для установок такого рода я не вижу перспектив использования в качестве энергетических источников для двигателей. Вы можете представить себе ИТЭР весом в 23 000 тонн, с необходимыми периферийными устройствами, плотно размещенными на 180 га, в качестве источника энергии для двигателя? У меня это не очень получается. Зато технологии, которые появляются в работах по термояду, те же методы нагрева плазмы, могут быть востребованы в самых разных областях.

— А отечественные токамаки как способствуют развитию технологий?

— Советские, а затем российские токамаки открыли путь в жизнь многим передовым технологиям. Так, наш предыдущий флагман — токамак Т-10 — обусловил разработку и развитие производства мощных генераторов высокочастотного излучения — гиротронов. Мировое лидерство России в этой области обеспечивается ИПФ РАН с дочерним предприятием «Гиком» из Нижнего Новгорода. Также существенное развитие получили мощные атомарные пучки (мировой лидер — Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера в Новосибирске). Именно токамаки подтолкнули развитие технологий создания материалов и конструкций для съема экстремально высоких тепловых нагрузок (уровня примерно 10 МВт/м<sup>2</sup>). Не стоит забывать и о том, что каждый импульс современного токамака выдает колоссальное количество информации, в том числе требующей обработки в реальном времени для управления разрядом. Поэтому токамаки существенным образом стимулируют развитие ИТ-технологий.

Список можно продолжать еще долго, но хотелось бы особо отметить развитие технологий, ожидаемое в связи с реализацией нашего центрального сегодняшнего проекта — токамака с реакторными технологиями (ТРТ), разрабатываемого на основе ВТСП-проводников. Такой крупный заказчик, как ТРТ, даст существенный импульс развитию ВТСП-технологий в России для широкого применения в самых разных областях. В качестве же энергетически значимого устройства мы ожидаем, что проект ТРТ не только закроет важные пробелы в технологической платформе ИТЭР, но и станет реальным прототипом источника термоядерных нейтронов в будущем гибридном (синтез — деление) реакторе. Причем у него больше шансов реализоваться в ближайшей перспективе, чем у «чистого» термоядерного реактора.

Текст: Сергей Петровский  
 Фото: LLNL, EuroFUSION, ASIPP

National Ignition Facility (NIF) в Ливерморской национальной лаборатории в США — крупнейшая в мире установка для исследований в области инерциального удержания плазмы

# Звезды зажигают

Оптимистический взгляд на коммерческое будущее термоядерных технологий



У идеи приручить в самое ближайшее время энергию, бушующую внутри звезд, по-прежнему есть оптимистичные сторонники и скептические противники. Первые сегодня утверждают, что до появления термоядерной станции, поставляющей электроэнергию в сеть, осталось примерно десять лет. В пользу этого говорит тот факт, что в последние годы термоядерный синтез начал привлекать инвесторов и все больше частных компаний, а правительства США, Великобритании, Китая и других государств продвигают и поддерживают самые смелые проекты. Рассказываем о некоторых важных научных достижениях последнего времени и основанных на них больших коммерческих планах разных стран.

## Энергетическая безубыточность

В декабре 2022 года США объявили о научном прорыве. Ученые из Ливерморской национальной

лаборатории им. Э. Лоуренса (LLNL) впервые в истории осуществили реакцию термоядерного синтеза, которая дала в 1,5 раза больше энергии, чем было потрачено на ее запуск. Мировое научное сообщество отнеслось к этому сообщению осторожно. Эксперты оценивали результаты около года и лишь затем согласились с выводами авторов эксперимента.

Еще в 1960-е годы ученые обосновали возможность запуска реакции синтеза с использованием мощных лазеров для быстрого нагрева термоядерного топлива. Из-за инерции образовавшаяся плазма не успевает разлететься (это состояние называют инерциальным удержанием), создавая температуру и давление, необходимые для преодоления энергии отталкивания протонов. Расчеты показывают, что с повышением температуры плазмы скорость реакции и саморазогрев системы должны быстро нарастать, поэтому для поддержания синтеза будет требоваться все меньше энергии от внешних источников.

Эксперимент LLNL проводился на установке National Ignition Facility (NIF) — крупнейшей и самой мощной лазерной системе в мире. 192 лазера доставили

до алмазной капсулы с топливом (220 мкг смеси дейтерия и трития) 2,05 МДж энергии. Масштабы таковы: установка NIF — размером со стадион, а капсула — с горошину перца. Чтобы выполнить термоядерное зажигание, капсулу поместили в хольраум — миниатюрную золотую цилиндрическую камеру. В результате взаимодействия лазера и хольраума генерируется рентгеновское излучение, которое нагревает и сжимает капсулу, создавая центральную точку температурного максимума внутри таблетки, где и происходит термоядерная реакция. В месте фокусировки лазеров в момент импульса было создано давление до 600 млрд атмосфер и температура 151 млн °С, при этом внутренняя часть капсулы сжалась до плотности, в 100 раз превышающей плотность свинца, заставляя атомы изотопов водорода сливаться в гелий. Примерно через 70 триллионных секунды капсула взорвалась, и произошел выброс энергии 3,15 МДж.

В течение 2023 года, после ряда усовершенствований, коснувшихся лазеров, капсулы с топливом, самого топлива и условий зажигания, были получены еще более впечатляющие результаты: выход 3,5 МДж, а затем 3,88 МДж при той же энергии входа, то есть коэффициент в итоге достиг почти 1,9. Это стало наивысшим на сегодняшний день достижением в сфере инерциального термоядерного синтеза. Правда, для того чтобы начался полностью самоподдерживающийся процесс, капсула должна выделять примерно в 30 раз больше энергии, чем она поглощает. Однако, по мнению ученых, уже достигнутый успех знаменует начало новой эры в термоядерных исследованиях.

Разумеется, до коммерческого применения технологии еще слишком далеко. Энергия, потраченная на питание 192 лазеров и поддержку процесса, превышает 400 МДж, то есть КПД NIF как энергетической установки пока меньше 1%. Тем не менее компания Longview Fusion Energy, опираясь на результаты NIF, заключила контракт на проектирование первой в мире коммерческой электростанции с технологией лазерного термоядерного синтеза. Планируется, что станция Longview будет использовать гораздо более эффективные и мощные лазеры, чем NIF. Компания предполагает, что пилотная термоядерная установка, которая первоначально будет работать на мощности 50 МВт, сможет поставлять электричество в сеть к началу 2030-х. В период с 2030 по 2050 год компания планирует вывести на рынок установку мощностью 440 МВт.

## Магниты vs лазеры

На Объединенном европейском токамаке (Joint European Torus, JET) в конце 2023 года также был установлен рекорд по количеству произведенной энергии. Исследователи получили 69 МДж в результате термоядерной реакции, продолжавшейся 5 секунд, и превзошли свой предыдущий результат 2022 года на 10 МДж. Энергия, которая высвободилась из 0,21 мг термоядерного топлива, эквивалентна той, которую можно получить при сжигании 2 кг угля. Авторы итогового пресс-релиза не преминули отметить, что по выходу энергии они

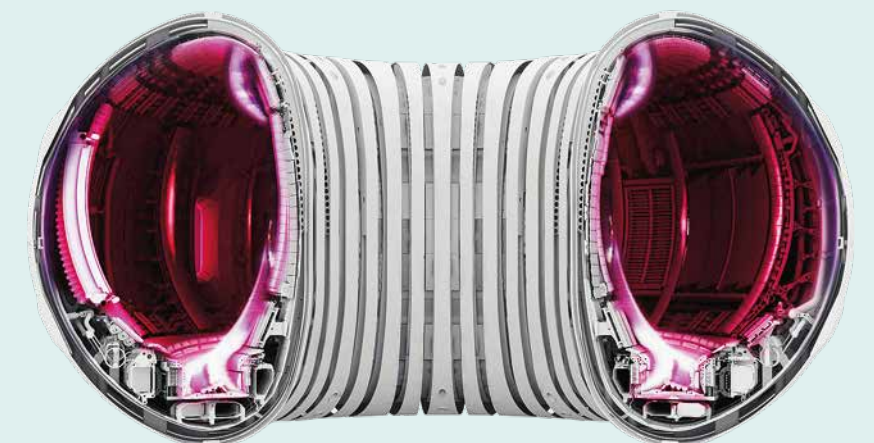
Японский стартап EX-Fusion представил план по уничтожению космического мусора с помощью лазеров, разработанных для термоядерного синтеза. Предполагается, что технологию можно использовать, не отправляя при этом лазеры в космос, а управляя ими с помощью специальных зеркал. Первоначально EX-Fusion будет работать с обломками менее 10 см в диаметре, которые лазерный луч будет замедлять, пока их орбитальная скорость не снизится настолько, что они упадут и сгорят в атмосфере Земли. По некоторым оценкам, в настоящее время вокруг нашей планеты вращается около 100 трлн частей старых спутников, которые могут повредить активные спутники, затруднить астрономические наблюдения и даже помешать запуску ракет в космос.

в 20 раз превзошли коллег из Ливермора, но, как и в случае NIF, на проведение эксперимента потребовалось гораздо больше энергии, чем было произведено в результате реакции.

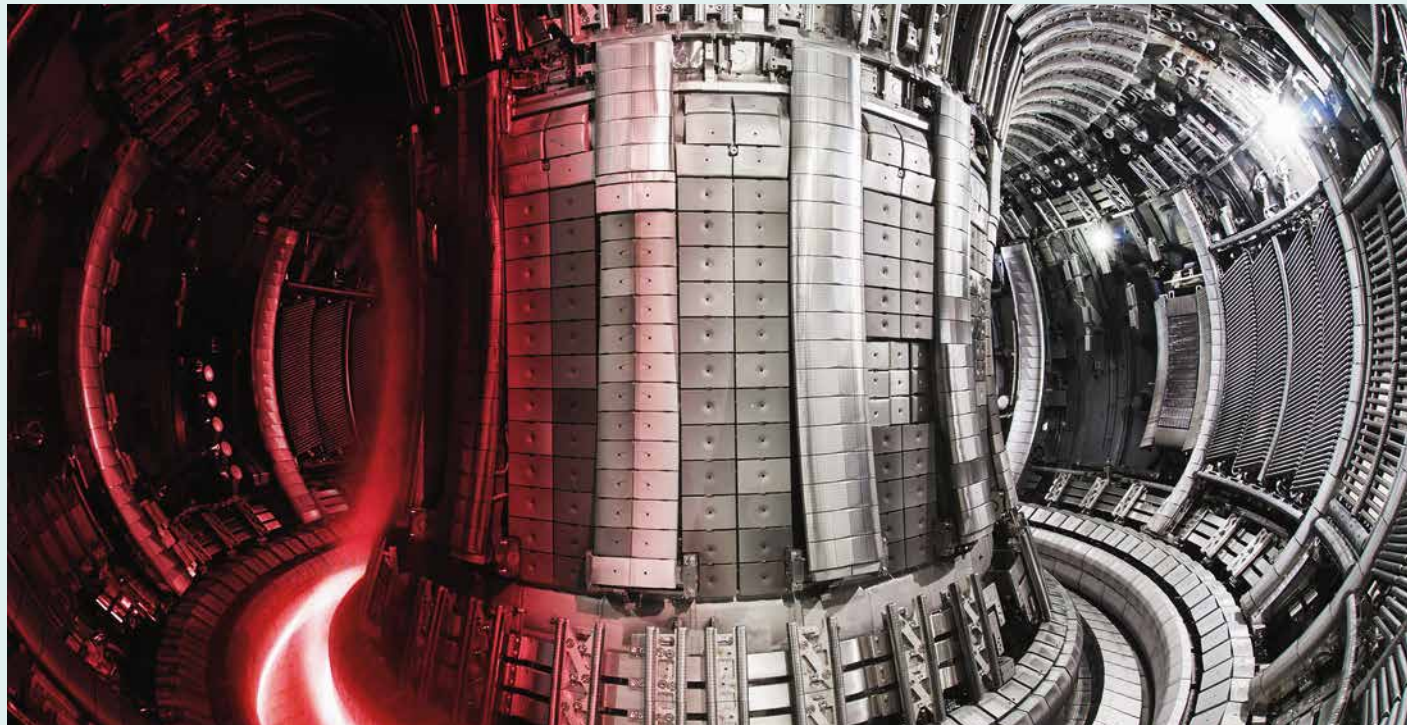
Рекорд был установлен во время заключительной серии экспериментов: JET, проработавший 40 лет, будет выведен из эксплуатации. Но опыт, полученный на нем (в том числе демонстрация возможности стабилизации края плазмы у стенки камеры), дал важные результаты для будущего ИТЭР, где также будет использоваться дейтерий-тритиевое топливо. Магниты JET с медной обмоткой позволили осуществлять термоядерный синтез в течение пяти секунд, но более длительная реакция привела бы к их перегреву. ИТЭР будет оснащен сверхпроводниковыми магнитами, которые позволят процессу продолжаться дольше, возможно более 300 секунд.

На смену JET должен прийти прототип коммерческого британского реактора под названием Сферический токамак для производства энергии (Spherical Tokamak

Вакуумная камера токамака JET в разрезе



Токамак Joint European Torus (JET) близ Оксфорда в Великобритании проработал 40 лет и дал важный опыт, который будет применяться в проекте ИТЭР



for Energy Production, STEP), который будет построен на месте выведенной из эксплуатации угольной электростанции в Ноттингемшире. На осуществление проекта выделено £650 млн (\$800 млн) на период до 2027 года. Правительство Великобритании надеется, что к началу 2040-х годов STEP станет одной из первых термоядерных установок в мире, которые будут поставлять электроэнергию в сеть.

STEP, как и JET, будет токамаком. Но в то время как JET и около 60 других работающих сейчас в мире

токамаков имеют тороидальную форму, STEP будет сферическим. Сферические токамаки теоретически могут быть более компактными и использовать меньшие по размеру и менее дорогие магниты. Это может облегчить коммерциализацию термоядерных установок, хотя для этого потребуются решить множество инженерных проблем.

На площадке в Ноттингемшире с подключением к сети есть место не только для одной станции, и многие компании смотрят на нее с интересом. Американский стартап True One Energy, который поддерживает инвестиционная компания Билла Гейтса Breakthrough Energy Ventures, хочет построить здесь стелларатор и к 2030 году начать работу на пилотной станции, которая сможет вырабатывать электроэнергию и поставлять ее в сеть. По предварительным оценкам, пилот будет стоить до £10 млрд, но стоимость будущих установок может составлять от трети до половины этой суммы.

### Экономика энергетики

Некоторые исследователи полагают, что коммерческий термоядерный синтез в течение последнего десятилетия совершил фазовый переход из области научной фантастики в плоскость практического применения: «квантовый скачок» в области сверхпроводников, лазеров и современных материалов на глазах меняет экономику термоядерной энергетики.

Команда разработчиков из Массачусетского технологического института (MIT) и частной компании Commonwealth Fusion Systems (CFS) сообщила о создании электромагнита массой 9 тонн, который обеспечивает устойчивое равномерное магнитное

## Термояд в контейнере

Израильский стартап nT-Taо к 2029 году обещает создать действующие прототипы небольших генераторов электроэнергии, использующих принцип термоядерного синтеза. По размерам установка будет сопоставима со стандартным морским контейнером, а ее мощность будет достигать 20 МВт. По расчетам, этого хватит, чтобы одновременно заряжать до 1000 электромобилей. Такая энергетическая установка сможет питать энергией зарядные станции, предприятия или ЦОДы в отдаленных районах, где нет линий электропередач достаточной мощности. Стоимость одной установки может составить от \$70 до \$100 млн, а себестоимость генерируемого киловатт-часа электроэнергии — от \$0,06 до \$0,13. В следующем десятилетии разработчики надеются начать коммерческие поставки таких электростанций.

Британская компания First Light Fusion объявила в марте, что побила мировой рекорд давления для кварца, подняв его с 1,5 ТПа (терапаскаля) до 1,85 ТПа (что в пять раз превышает давление в ядре Земли) и сохранив при этом характеристики образца. Для чего это нужно? Компания разработала уникальный «ускоритель» для запуска термоядерных реакций. Установка Machine 4 будет передавать топливной мишени энергию за счет удара кварцевого снаряда, разогнанного до скорости 60 км/с. Комбинация кинетического и лазерного импульсов обещает значительно снизить энергопотребление термоядерной установки.

поле силой более 20 Тл, что значительно превосходит характеристики используемых сегодня магнитов. Профессор Деннис Уайт, возглавлявший эту работу в Центре плазмы и термоядерного синтеза MIT, назвал разработку самым важным событием за последние 30 лет исследований в области термоядерного синтеза. «В одночасье это фактически изменило стоимость ватта термоядерного реактора почти в 40 раз», — прокомментировал он.

Для осуществления реакции синтеза необходимо сжимать топливо при чрезвычайно высоких температурах. Ни один известный материал не может их выдержать, поэтому плазма должна удерживаться очень мощными магнитными полями. Для их создания требуются сверхпроводящие магниты, которые изготавливаются из ниобиевых сплавов, обеспечивающих сверхпроводимость при температурах, близких к абсолютному нулю (4 К, или  $-270^{\circ}\text{C}$ ). Новый материал — оксид бария-меди-РЗМ — позволяет магнитам работать при температуре 20 К, что дает значительные инженерные преимущества. Еще одно ключевое нововведение — отсутствие изоляции тонких плоских сверхпроводящих лент магнита. Все это упрощает производственные процессы и существенно уменьшает размеры магнита, а вместе с тем и всего термоядерного реактора. Магнит представляет собой немного уменьшенную версию тех, которые будут формировать камеру токамака SPARC (Soonest Possible Affordable Robust Compact), который сейчас строит компания CFS в Массачусетсе.

Новые магниты, более компактные и дешевые, обещают дать большой выигрыш в экономической эффективности термоядерной установки. По словам главы CFS Боба Мамгаарда, эта революционная технология предполагает, что стоимость термоядерной энергии составит \$60–80 за МВт·ч.

### Кто первый?

В конце прошлого года в Китае были созданы две мощные структуры, которые должны ускорить сроки перехода к практическому использованию термоядерной энергии. Так, учреждена государственная компания China Fusion Energy Inc., которая объединит исследования и разработки, прежде распределенные между научными институтами и частными фирмами. Одновременно создан консорциум из 25 организаций во главе с Китайской национальной ядерной корпорацией.

Создание этих структур и передача им всех ранее разрозненных ресурсов дает понять, что власти Китая считают переход к термоядерной энергетике важной задачей. Китай позже других стран включился в термоядерную гонку, но быстро наверстывает упущенное. Неслучайно на конференции Ассоциации термоядерной индустрии (Fusion Industry Association, FIA), состоявшейся в марте в Вашингтоне, подчеркивалась необходимость найти способы привлечения большего количества средств на исследования и не отстать от Китая в гонке по разработке и строительству

коммерчески жизнеспособных реакторов. Эндрю Холланд, генеральный директор FIA, высказал опасения, что термоядерный синтез пойдет по пути солнечной энергетики, в том смысле, что большая часть технологий была изобретена в США, но в области производства доминирует Китай.

С 2011 по 2022 год Китай подал больше патентов в области термоядерного синтеза, чем любая другая страна. В 2023 году на китайском токамаке HL-2A впервые получена плазма силой более 1 млн ампер в режиме улучшенного удержания, а токамак EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak), разработанный Институтом физики плазмы в Хэфэе, поставил рекорд длительности поддержания высокотемпературной плазмы, проработав 403 секунды. Китай намерен построить промышленный прототип термоядерного реактора к 2035 году и внедрить технологию для крупномасштабного коммерческого использования к 2050-му.

Китайский Experimental Advanced Superconducting Tokamak

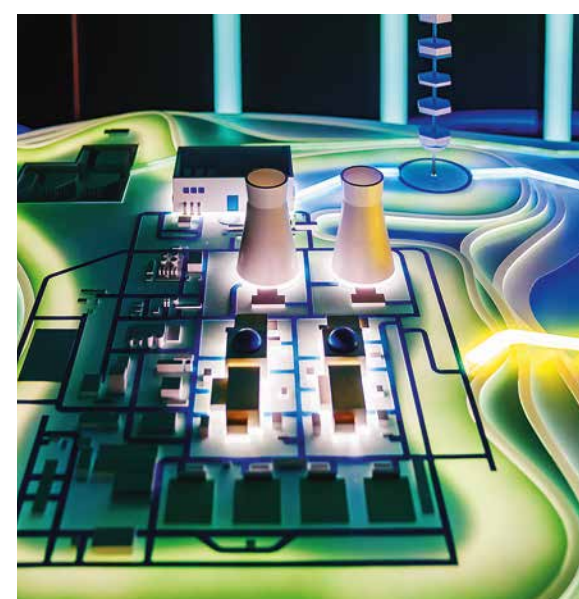
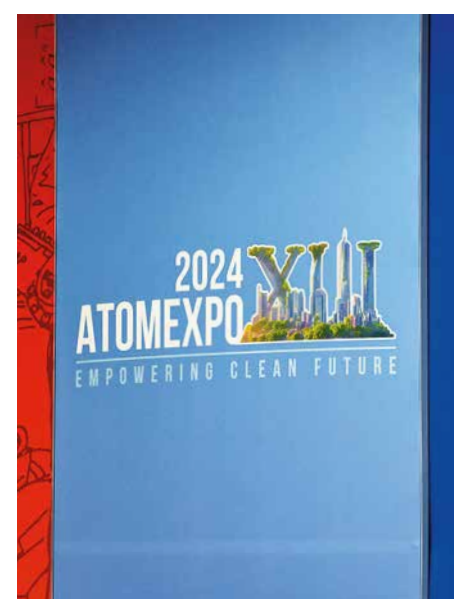
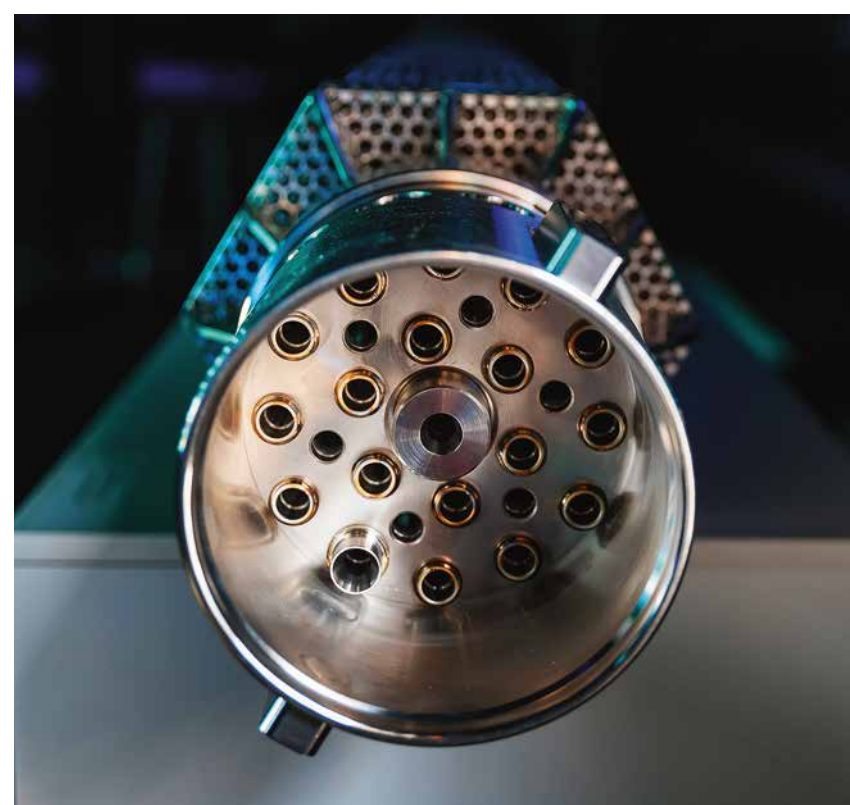


Фото: газета «Страна Росатом» / Алексей Башкиров; «Атомэкспо» / Даниил Соцков, Екатерина Павлюченко; Корпоративная Академия Росатома / Анастасия Дитрих

# Международный атом

Вспоминаем яркие моменты форума «Атомэкспо-2024»

25–26 марта 2024 года в Научно-технологическом университете «Сириус» (Федеральная территория «Сириус», Сочи) прошло одно из крупнейших событий мировой атомной отрасли — Международный форум «Атомэкспо-2024». Площадь выставочной части форума превысила 25,5 тыс. м<sup>2</sup>, экспозиции представили более 200 компаний-участников. Форум, ставший 13-м по счету, установил несколько рекордов: по количеству участников — около 4500, стран-участниц — 75 (на 10 больше, чем в 2022 году) и подписанных соглашений в сфере как ядерных, так и неядерных технологий — более 80 (почти вдвое больше, чем на «Атомэкспо-2022»).





Текст: «Вестник атомпрома»  
 Фото: оргкомитет Саммита HR-директоров России и СНГ

## Награда для «Атомного Оскара»

Жюри международного конкурса высоко оценило отраслевую программу признания «Человек года Росатома»

**Госкорпорация «Росатом» получила Гран-при Международной кадровой премии «Хрустальная пирамида — 2024» в номинации «Система признания и поощрения лучших сотрудников». Церемония награждения состоялась 21 марта в Москве.**

Жюри конкурса высоко оценило масштабность и основную миссию «Атомного Оскара» (внутреннее название программы признания «Человек года Росатома») — поощрение выдающихся заслуг сотрудников многопрофильной госкорпорации «Росатом», от рабочих и инженерных профессий до ИТ-специалистов и прорывных командных проектов.

«Программа признания создавалась в Росатоме с важной целью — подсветить заслуги работников, которые трудятся на местах, принося значимые производственные результаты как для отрасли, так и для всей страны. Когда на сцену выходят победители и лауреаты премии «Человек года Росатома», ликует весь зал. В такие мгновения понимаешь, что все мы — большая единая команда людей, которых связывают общие ценности, мечты и планы», — поделилась заместитель генерального директора по персоналу госкорпорации «Росатом» Татьяна Терентьева.



«В Год семьи особенно важно отметить, что с самого начала отличительной чертой программы признания Росатома стала возможность взять на церемонию награждения с собой члена семьи, чтобы вместе с близким человеком разделить момент славы», — рассказала на вручении премии руководитель проекта «Человек года Росатома» Маргарита Быкова. — Кроме того, для финалистов и их семей из регионов и зарубежных стран организуется культурно-образовательная программа по городу проведения церемонии награждения. Для многих это возможность впервые увидеть столицу или город присутствия Росатома».

Программа признания «Человек года Росатома» в 2023 году отметила свой 10-летний юбилей. В настоящее время программа насчитывает 78 дивизиональных, общедивизиональных, общекорпоративных и специальных номинаций. Критериями отбора являются значимые результаты работы, эффективные подходы к решению задач, разделение корпоративных ценностей и профессиональные качества кандидатов. Финалисты получают награды из рук первых лиц отрасли. В программе признания принимают участие 360 тыс. сотрудников из 460 организаций отрасли. За 10 лет подано более 20 000 заявок, награждено около 3000 финалистов.

Росатом является обладателем престижных российских наград как лучший работодатель. В частности, Росатом признавался лучшим работодателем страны по итогам 2018 и 2020 годов (по версии группы компаний HeadHunter). Госкорпорация была неоднократно отмечена призами авторитетных HR-форумов и конкурсов.

Международная премия «Хрустальная пирамида» была учреждена в 2011 году оргкомитетом Саммита HR-директоров России и СНГ в сотрудничестве с Российским союзом промышленников и предпринимателей и ежегодно присуждается для распространения лучшего опыта управления кадрами, а также поощрения организаций, внедряющих передовые методы и технологии в области управления персоналом.

В этом году на премию было подано более 30 заявок в двух категориях: мотивация и внутренние коммуникации. Ранее Гран-при «Хрустальной пирамиды» получали заместитель генерального директора по персоналу госкорпорации «Росатом» Татьяна Терентьева (в номинации «HR-руководитель года») и Корпоративная Академия Росатома (в номинации «Лучший корпоративный университет года»).

Текст: «Вестник атомпрома»  
 Фото: оргкомитет АКМР

## О людях и для людей

Фильм «Росатом — это мы» и видеопродукты Инжинирингового дивизиона стали победителями всероссийского конкурса «Лучшее корпоративное видео»

20 марта прошла церемония награждения победителей всероссийского конкурса «Лучшее корпоративное видео» Ассоциации директоров по коммуникациям и корпоративным медиа России (АКМР) — единственной в стране профессиональной ассоциации топ-менеджеров по корпоративным коммуникациям. Фильм «Росатом — это мы» получил награды сразу в двух номинациях: «Лучший корпоративный фильм о сотрудниках» и «Лучший ведущий». Также лауреатами конкурса в номинациях «Лучшая анимация» и «GR-видео» стали видеопродукты Инжинирингового дивизиона Росатома, посвященные охране труда и промышленной безопасности на площадках сооружения АЭС и доставке партии ядерного топлива на АЭС «Руппур».

Награды вручали Василий Борисов, председатель Фестиваля корпоративного видео, генеральный директор «Борисов и партнеры», и Наталья Власова, генеральный директор АНО «Новые русские медиа».

Первый корпоративный фильм о сотрудниках «Росатом — это мы» был снят к 10-летию ежегодной отраслевой программы признания «Человек года Росатома» и построен как серия документальных портретов 11 финалистов разных лет из России, Беларуси и Турции. Генеральным продюсером фильма стала заместитель генерального директора по персоналу госкорпорации «Росатом» Татьяна Терентьева, руководителем проекта — руководитель отраслевой программы признания «Человек года Росатома» Маргарита Быкова, режиссером выступил Игорь Морозов, главным редактором — заместитель гендиректора по управлению персоналом АО «Атомэнергомаш» Юлия Николаева.

При выборе рассказчика фильма у кинокоманды не возникло сомнений, что лучше всего на эту роль подойдет бесценная ведущая церемоний награждения «Человека года Росатома» Яна Чурикова. Пообщавшись со всеми героями и их семьями, она стала настоящим амбассадором Росатома.

Репортаж о фильме на канале «Россия 24» посмотрели более 11 000 человек. Его сокращенная версия получила 162 000 просмотров в 25 городах по сетке



вещания ТВ «Страна Росатом», а также вышла в эфире 18 телеканалов городов присутствия предприятий атомной отрасли. Было создано 11 роликов для дивизионов, включая две зарубежные АЭС. На основе фильма был выпущен профоринформационный ролик для вузов, ссузов и школ к 1 сентября 2023 года.

Опрос по итогам кинопремьеры (более 1400 гостей, HRD 9 дивизионов, топ-100 руководителей и финалистов) показал общую оценку 4,9 из 5. Оценка идеи привлечения семьи и детей для раскрытия характера героев фильма — 5 из 5.

В 2024 году запланирован выпуск продолжения фильма в виде серии подробных сюжетов о каждом герое — чтобы еще шире показать возможности работы в Росатоме и людей, играющих важную роль в профессиональной и личной жизни героев.

Конкурс проводится с 2009 года и позволяет выявить профессиональные и творческие возможности корпоративного видео, оценить уровень и перспективы дальнейшего развития отрасли. В этом году более 40 организаций представили 187 проектов в 34 номинациях.

QR-код для просмотра фильма:



Текст: Маргарита Климан  
 Фото: «Русатом РДС»

# Диверсификация на вырост

Предприятия ОПК атомной отрасли перевыполнили план производства высокотехнологичной гражданской продукции

**Госкорпорация «Росатом» досрочно выполнила поручение президента Российской Федерации Владимира Путина, нарастив долю высокотехнологичной гражданской продукции в общем объеме производства организаций ОПК до 52%. По плану достичь 50% необходимо было к 2030 году. Рассказываем о подходах и пути к результату.**

В 2016 году президент Владимир Путин поставил задачу увеличить долю высокотехнологичной продукции гражданского и двойного назначения (далее — высокотехнологичная гражданская продукция) в общем объеме производства организаций ОПК до 30% к 2025 году и до 50% к 2030 году. Процесс получил название «диверсификация производства оборонных предприятий», или «диверсификация ОПК».

## Для чего нужна диверсификация

В отличие от предшествующих волн конверсии, реализуемых в том числе в советские годы, диверсификация ОПК ориентирована на производство востребованной и конкурентоспособной высокотехнологичной гражданской продукции.

Логика проста: распространенная ранее практика создания новых технологий на основе локализации иностранных продуктов показала, что технологии не передаются в полном объеме либо не передаются совсем, что делает невозможным дальнейшее их развитие и получение новых продуктов. Поэтому единственный

верный путь в такой ситуации — создавать технологии самостоятельно. Решить эту задачу и помогает ОПК.

В российском ОПК сконцентрированы основные наукоемкие производства, обладающие необходимыми знаниями, производственными возможностями и кадрами. Нашей стране, находящейся под нелегитимными санкциями и ограничениями, необходим этот задел для создания новых высокотехнологичных отраслей для обеспечения своей безопасности и технологического суверенитета.

## Диверсификация в Росатоме

В атомной отрасли с момента ее создания развивались технологии, которые в силу различных ограничений невозможно было импортировать. Атомщики создавали собственные компетенции и продукцию как в атомной энергетике, так и за ее пределами.

Текущая волна диверсификации ОПК потребовала доработки организационных процессов: с одной стороны, надо обеспечивать выпуск традиционной оборонной продукции на высоком уровне, с другой — отлаживать выпуск востребованной высокотехнологичной гражданской продукции. «Главной проблемой было перестроить мышление и самим начать искать, какие высокотехнологичные продукты нужны гражданскому рынку. Определив цели, мы начали создавать их, настроили рабочие процессы и получили первые обнадеживающие результаты», — говорит заместитель директора по развитию гражданской

## Динамика прироста новых направлений бизнеса, основанных на компетенциях организаций ЯОК

### 2019–2020

- Лазерные технологии
- Цифровая энергетика
- Цифровые продукты
- Материалы для микроэлектроники

### 2021

- Силовая преобразовательная техника и электроника
- Сверхпроводимость
- Крупные электрические машины
- Новые электротехнические материалы
- Специальная медицинская техника
- АСУ ТП и электротехника
- Водородная энергетика

### 2022–2023

- Автоэлектроника и компоненты
- Системы безопасности
- Критическая информационная инфраструктура



На фото

Диверсификация ОПК ориентирована на производство востребованной и конкурентоспособной высокотехнологичной гражданской продукции. В числе разработок — не имеющий аналогов в мире аппарат для терапии оксидом азота «Тианокс» и комплекс ударно-волновой и контактной литотрипсии с высокоточной ультразвуковой и рентгенонавигацией для лечения мочекаменной болезни

продукции филиала ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» «НИИИС им. Ю. Е. Седакова» Николай Акимов.

В настоящее время диверсификация оборонно-промышленного комплекса Росатома структурирована с помощью более 300 проектов и программ, объединенных отраслевой программой диверсификации до 2030 года.

Отбор направлений для диверсификации основывается на наличии компетенций, критериях экономической эффективности и востребованности рынком. В рамках проектов, находящихся на различных стадиях жизненного цикла, отраслевые организации развивают судостроение, малую атомную генерацию и водородную энергетiku, оборудование для СПГ и нефтедобычи, накопители энергии, создают новые цифровые продукты, автоматизированные системы управления технологическими процессами и электротехнику, бортовые комплексы управления космических аппаратов, ядерную медицину, новые материалы, аддитивные технологии, оборудование физической защиты, системы безопасности, работают в ряде иных направлений — и тем самым вносят вклад в обеспечение технологического суверенитета России.

«Вызовы последних лет определили курс по максимальному вовлечению организаций ОПК атомной отрасли в обеспечение технологического суверенитета и использование потенциала отрасли при реализации национальных проектов», — комментирует начальник

управления импортозамещения, диверсификации ОПК и стратегических проектов Росатома Александр Згрюев.

Построенная в Росатоме система управления по ежегодному достижению показателей по доле высокотехнологичной гражданской продукции задействует две трети дивизионов. Растет роль отраслевых интеграторов новых направлений бизнеса: они берут на себя развитие бизнеса в целом, взаимодействие с заказчиком, запуск и реализацию новых продуктов. Благодаря интеграторам организации ОПК в госкорпорации не отвлекаются на взаимодействие с рынком и потому могут сосредоточиться на технологиях и производстве.

«Формирование системы управления новыми бизнесами начато еще в 2012 году наряду с вовлечением организаций ЯОК в гражданские проекты атомной отрасли. Перечень направлений корпорации в части новых бизнесов закреплен в 16 стратегических программах и 66 продуктовых стратегиях и бизнес-инициативах. Выручка по этим направлениям бизнеса по итогам 2023 года превысила 1 трлн рублей», — отмечает директор департамента поддержки новых бизнесов Росатома Дмитрий Байдаров.

## Новый заказ

Ключевым изменением в диверсификации ЯОК стало изменение подхода: вместо производства так называемой прочей продукции организации дивизиона начали целенаправленно работать над

государственным технологическим заказом (ГТЗ). Это заказ организациям ЯОК на высокотехнологичные продукты, товары, услуги, технологии, необходимые для обеспечения технологического суверенитета страны и атомной отрасли. Такая необходимость возникла в результате событий 2022 года — понадобилось замещать товары компаний из недружественных стран, ушедших с российского рынка, занимать освободившиеся рыночные сегменты.

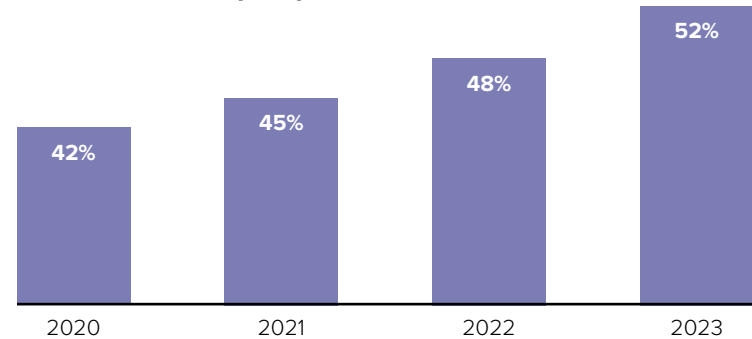
«Для этой работы мы, исходя из потребностей предприятий России и атомной отрасли, определили перечень продуктов, разработку и производство которых можно организовать на предприятиях ЯОК. Далее при участии специалистов нашего дивизиона были выбраны наиболее коммерчески перспективные продукты. Задачи по формированию кооперационных цепочек и коммерциализации продуктов легли на специально созданную компанию — «Русатом РДС», который стал оператором ГТЗ», — комментирует директор по гражданской продукции ЯОК Росатома Денис Анищук.

Благодаря работе «Русатом РДС» с рынком, чуткому реагированию на запросы клиентов и умению преодолевать возникающие сложности, были организованы разработка и производство целого ряда продуктов. Это медицинские изделия, например аппарат для терапии оксидом азота «Тианокс» и лазерный литотриптор, а также геонавигационный комплекс RUS-120 и многие другие.

Выработанные госкорпорацией подходы и активное взаимодействие дивизионов позволили по итогам 2023 года достичь доли высокотехнологичной гражданской продукции в общем объеме производства организаций оборонно-промышленного комплекса атомной отрасли в 52%. Таким образом, Росатом досрочно выполнил поручение президента России.

Это не финал работы, диверсификация продолжится. «На текущих результатах мы не останавливаемся и к 2030 году планируем выйти в диапазон показателей доли 65–70%, конечно же, в первую очередь за счет роста объемов гражданского производства», — заявляет гендиректор Росатома Алексей Лихачев.

Динамика диверсификации



## Подробности

**В рамках более 300 проектов** организации ОПК наращивают гражданские компетенции и обеспечивают вклад в реализацию транспортной части национального проекта «Комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры», участвуют во всех федеральных проектах Комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации», в создании научного центра мирового уровня «Национальный центр физики и математики» в Сарове, развивают продуктовые направления полимерных и композитных материалов, ядерную медицину, создают цифровые продукты, оборудование для СПГ и нефтедобычи, вносят вклад в обеспечение технологического суверенитета России и в ряде иных направлений.

### В числе высокотехнологичной продукции:

■ Аппарат для терапии оксидом азота «Тианокс». Эта уникальная отечественная разработка не имеет аналогов в мире. Аппарат используется при различных травмах грудной клетки и повышает уровень выздоровления пациентов за счет улучшения параметров гемодинамики (стабилизация показателей насыщения крови кислородом, давления и др.).

■ Аппаратно-программный полигенераторный комплекс ударно-волновой и контактной литотрипсии с высокоточной ультразвуковой и рентген-навигацией. Эта инновационная российская разработка учитывает все новейшие методы лечения мочекаменной болезни.

■ Программно-технический комплекс системы верхнего блочного уровня (ПТК СВБУ) энергоблока АЭС. ПТК СВБУ осуществляет функционирование СВБУ во всех предусмотренных проектом режимах энергоблока: плановых пусках и остановках; режиме нормальной эксплуатации; нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварийные режимы. А также программно-технический комплекс системы верхнего станционного уровня (ПТК СВСУ). Он обеспечивает сбор и представление информации о состоянии технологического оборудования и систем энергоблоков, общестанционных технологических систем.

■ Импортозамещающий геонавигационный комплекс для нефтегазодобычи RUS-120. Комплекс призван повысить добычу углеводородного сырья, а также уменьшить затраты на строительство и эксплуатацию скважин.

Текст: Наталья Самойлова

Фото: Инжиниринговый дивизион Росатома

# Сжечь и обезвредить

## Новая технология переработки РАО для Курской АЭС-1

**Обеспечение безопасности, в том числе радиационной, на всех этапах жизненного цикла АЭС — безусловный приоритет атомной отрасли. Стратегия развития атомной энергетики в России предполагает значительное увеличение доли атомной генерации в энергобалансе, а значит, требует также оптимизации подходов к переработке и хранению радиоактивных отходов, образующихся в процессе эксплуатации АЭС. В настоящее**

**время Инжиниринговый дивизион Росатома находится на финальной стадии выполнения значимого проекта — сооружения комплекса по переработке радиоактивных отходов (КП РАО) Курской АЭС-1, где будет применяться метод низкотемпературного пиролиза ионообменных смол (ИОС). Рассказываем, в чем заключаются особенности предложенной технологии переработки и в чем ее важность для атомной отрасли.**

### Задача со звездочкой

Одной из важных задач при переработке РАО, образующихся при эксплуатации АЭС, является переработка отработанных ионообменных смол (ОИОС).

Ионообменные смолы на АЭС с реакторами РБМК и ВВЭР применяются для очистки теплоносителей и других водных сред. При эксплуатации каждого энергоблока АЭС ежегодно образуется определенный объем ОИОС, которые необходимо утилизировать как радиоактивные отходы.

Сложность переработки ОИОС связана с содержанием в них влаги и органических веществ (из-за этих особенностей захоронение радиоактивных ОИОС невозможно без их предварительной обработки).

### Сложности и возможности

«Переработка ионообменных смол является наиболее сложной и дорогостоящей операцией по сравнению с другими видами переработки РАО. На сегодняшний день не существует готовых к тиражированию установок для переработки данного вида РАО. До настоящего времени в качестве основных методов переработки ОИОС использовались отверждение смол посредством включения их в связующий материал (цементирование) и сушка ОИОС с последующим хранением в контейнерах типа НЗК в хранилище РАО», — объясняет технический директор одного из предприятий Инжинирингового дивизиона госкорпорации «Росатом» Денис Федоров.

Цементирование обладает рядом преимуществ перед другими методами отверждения РАО: цементный компаунд является инертной матрицей, а технология проста и имеет низкую себестоимость. Однако при отверждении ОИОС степень включения смол в матрицу составляет всего 5–10%. Применение данной технологии переработки ОИОС приводит

к значительному увеличению объема РАО. Существуют и другие методы кондиционирования.

Возможно включение ОИОС в полимерную матрицу. Полимеризация проходит без нагревания. Полимерные матрицы обладают химической стойкостью, а также стойкостью к влиянию механических, термических и радиационных нагрузок. При этом технология включения ОИОС в полимеры достаточно проста в исполнении. Однако кондиционирование ОИОС с использованием данных технологий является очень дорогостоящим и не ведет к существенному снижению объемов РАО.

Метод сверхкритичного водного окисления для переработки ОИОС обеспечивает полное одностадийное превращение органических веществ в безвредные CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> с образованием оксидов и гидроксидов металлов, разделение твердой и жидкой фаз фильтрацией

## Справка

В состав КП РАО Курской АЭС-1 входят комплекс по переработке жидких радиоактивных отходов (КП ЖРО), хранилище переработанных РАО (ХП РАО) и комплекс по переработке твердых радиоактивных отходов (КП ТРО), который Инжиниринговый дивизион Росатома возвел и оснастил уникальным оборудованием под ключ (аналогов данного комплекса в России до этого не существовало). В 2023 году завершились комплексные испытания всех систем КП ТРО. В апреле 2024 года Курская АЭС получила лицензию на начало опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ) КП РАО. После проведения ОПЭ комплекс будет введен в промышленную эксплуатацию.



и последующую дезактивацию жидкой фазы. Этот метод находится на стадии лабораторных исследований и крайне сложен для промышленного освоения, а также является дорогостоящим технологическим решением.

Метод пиролиза широко используется, в том числе при утилизации бытовых отходов. Такой способ позволяет значительно снизить объемы РАО и получить инертный конечный продукт, не содержащий органических компонентов. Процесс пиролиза отходов, как правило, проводится при температурах от 800 до 1200 °С. Однако, как показывают исследования, при термическом разложении РАО в диапазоне указанных температур происходит значительный унос радиоизотопов с отходящими пиролизными газами, что снижает эффективность переработки отходов методом пиролиза.

В Инжиниринговом дивизионе Росатома разработана технология низкотемпературного процесса пиролиза для переработки ОИОС. Технология предусматривает предварительное отделение от ОИОС транспортной воды и ее термическую обработку в вертикальном пиролизном реакторе при температуре 450 °С в среде инертного газа, отходящие пиролизные газы очищаются в системе газоочистки. Разработанная технология пиролиза впервые реализована на КП ТРО Курской АЭС-1.

В рамках сооружения КП ТРО было изготовлено и смонтировано оборудование системы пиролиза, включающее:

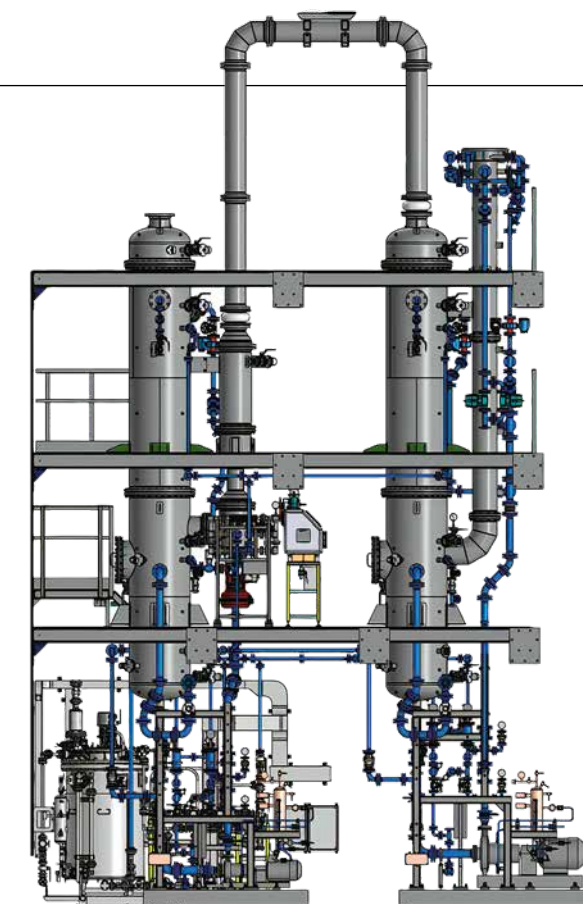
- оборудование участка подачи смол;
- оборудование участка приема смол и передачи на переработку;
- оборудование участка пиролиза;
- оборудование участка дожигания пиролизного газа;
- оборудование участка газоочистки.

#### Как это работает

Проведенные испытания разработанной технологии пиролиза на реальных ОИОС позволили эффективно переработать смолы с сокращением их объема в шесть-восемь раз. Производительность пиролизного реактора составляет до 25 кг/ч (в реактор поступает водонасыщенная смола при соотношении воды и ИОС 1 : 1).

Отходящие пиролизные газы дожигаются в камере дожигания при температуре до 1100 °С. Дымовой газ доочищается в системе газоочистки, состоящей из форсуночного скруббера и скруббера Вентури. При необходимости отходящие газы подвергаются дополнительной очистке на фильтрах тонкой очистки.

Система газоочистки позволяет довести содержание веществ в газовой среде, направляемой в окружающую среду, до состояния, не превышающего установленные нормативные показатели.



#### На рисунке

Оборудование участка газоочистки (включает скрубберы, емкость NaOH, узел нейтрализации, узел фильтров тонкой очистки, узел поддержания разрежения)

Получаемый конечный продукт (коксовый остаток) для дальнейшего кондиционирования размещается в 100-литровой бочке, которая установлена в 200-литровой бочке в случае повышенной удельной активности. Свободное пространство в 200-литровой бочке заполняется цементным раствором.

#### Преимущества технологии

По сравнению с высокотемпературными технологическими процессами переработки РАО разработанная технология низкотемпературного пиролиза обладает рядом существенных преимуществ: проведение деструкции ОИОС при низких температурах позволяет предотвратить унос летучих радионуклидов, например Cs-134/7, в дымовой газ; технология пиролиза характеризуется достаточно высокой производительностью и позволяет значительно сократить объем РАО — до шести-восьми раз. Разработанная технология позволит значительно упростить процесс переработки и хранения РАО и способна в дальнейшем тиражироваться для АЭС в России и за рубежом.

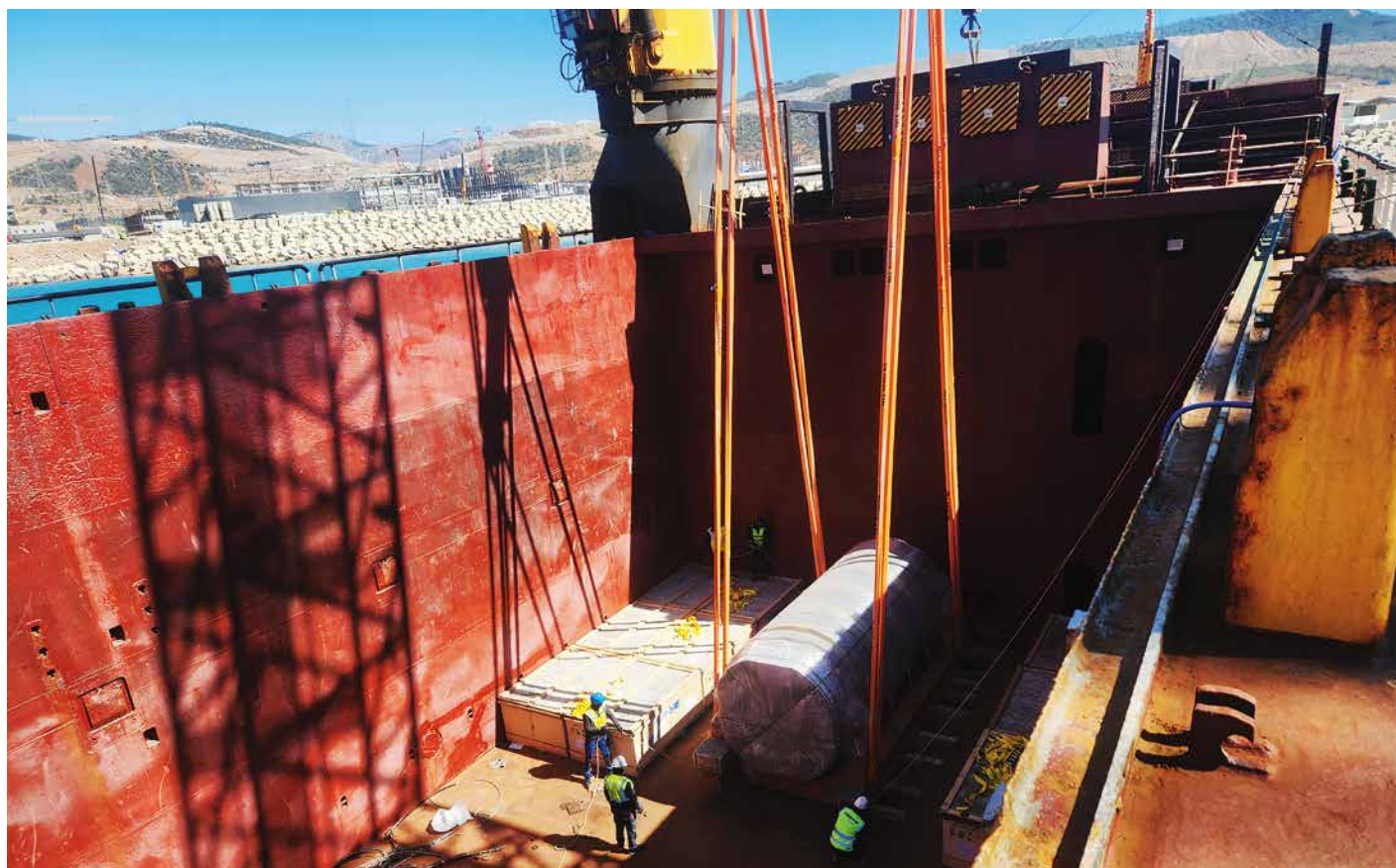


#### На фото

Автоматизированное рабочее место оператора системы пиролиза

Текст: Ирина Дорохова  
Фото: АО «Техснабэкспорт»

Доставка первого ТУКа для АЭС «Аккую»



## ТУК в помощь

Росатом создает востребованную рынком линейку систем для транспортировки и хранения ОЯТ

АО «Техснабэкспорт» (дивизион «Сбыт и трейдинг» госкорпорации «Росатом») развивает бизнес в сегменте упаковок для перевозки и хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Росатом предлагает своим клиентам транспортно-упаковочные комплекты (ТУКи, их также называют контейнерами) для вывоза ОЯТ на переработку. Похожая схема уже отработана в России. Первый ТУК для АЭС «Аккую» был отправлен в феврале, а в апреле доставлен на площадку строительства АЭС.

### Вхождение на рынок

Любой радиоактивный материал, облученный или нет, должен перемещаться в упаковке, которая обеспечивает безопасность окружающей среды и обращающихся с этим материалом людей. Рекомендации

относительно качественных характеристик упаковок разработало МАГАТЭ. Также есть национальные требования регуляторов.

ТУКи для ОЯТ — самые технически сложные изделия в ряду специализированных упаковок, поскольку они должны выдерживать высокие радиационные и тепловые нагрузки и при этом быть транспортабельными и использоваться многократно.

ТУКи и в целом системы транспортировки и хранения ОЯТ — развитый сегмент мирового атомного машиностроительного рынка. Так, на рынке систем сухого хранения ОЯТ легководных реакторов долю свыше 70% сейчас занимают две американские компании (Holtec занимает около 40%, NAC — около 7,5%) и одна французская (Orano TN с долей около 25%). Также на рынке представлены европейские, корейские и японские решения, свои решения разрабатывает Китай. Россия последние 20 лет вела разработки только в узкоспециализированных сегментах ТУК для ОЯТ АПЛ, РБМК,

БН-350. Но сейчас ситуация исправляется: появляются разработки для коммерческих реакторов типа ВВЭР.

АО «Техснабэкспорт», который уже более полувека поставляет на мировой рынок продукцию советской, а теперь российской атомной отрасли, с 2019 года реализует инвестиционный проект — создает востребованную рынком линейку ТУКов для ОЯТ АЭС, чтобы занять в сегменте транспортных упаковочных систем и систем длительного хранения долю, соответствующую амбициям Росатома на мировом атомном рынке.

«АО «Техснабэкспорт» провел маркетинговые исследования, определил потребности потенциальных покупателей, сформировал в соответствии с ними внутренний заказ, разработал и согласовал с проектантом АЭС, Топливной компанией «ТВЭЛ», разработчиками реакторных установок и прочими заинтересованными сторонами техническое задание для создания востребованных продуктов. В соответствии с техническим заданием разработана конструкторская документация. Теперь АО «Техснабэкспорт» последовательно ведет работу по обоснованию безопасности применения отечественных ТУКов для их применения на площадках зарубежных АЭС, строящихся Росатомом», — говорит директор по ОЯТ и сбалансированному ЯТЦ АО «Техснабэкспорт» Игорь Гусаков-Станюкович.

В настоящее время уже изготовлены и испытаны головные экземпляры моделей ТУК-137Т.Р и ТУК-137Т.А1. Первая модель предназначена для российских АЭС с реакторами ВВЭР-1200 и Белорусской АЭС. Вторая — для АЭС «Аккую».

### Ребра различий

Предшественником ТУКов 137-й серии был ТУК-109Т. Его в конце 2000-х годов разработали для транспортировки топлива для реакторов РБМК. Всего было изготовлено девять таких ТУКов — небольшая, но серия. У ТУК-109Т и 137-й серии единая техническая концепция — это сэндвич с двумя корпусами, между которыми расположены блоки биологической защиты (от гамма-излучения) и блоки нейтронной защиты (от потока нейтронов). Кроме того, конструкторы учитывали данные натурных испытаний головного ТУК-109Т. Но ТУКи 137-й серии рассчитаны на более высокие тепловые и радиационные нагрузки, чем их предшественник.

В отличие от ТУК-13, используемых для транспортировки ОЯТ АЭС с РУ ВВЭР-1000, в конструкции ТУКов 137-й серии жидкая нейтронная защита заменена на твердую. Вместо одной крышки предусмотрено две. И если с внешней что-то случится, радиоактивные частицы все равно не выйдут наружу. Кроме того, контейнеры более вместительные: в них входит не 12 ОТВС, как в ТУК-13, а 18 ОТВС. Притом что и сами ОТВС реакторов типа ВВЭР-1200/1300 имеют большую исходную массу урана.

ТУК-137Т.Р предназначен для транспортировки ОЯТ с российских АЭС на ПО «Маяк» или Горно-химиче-

ский комбинат на переработку и хранение, так как в России действует централизованная система обращения с отработавшим топливом. ТУК-137Т.А1 предназначен не только для транспортировки, но и для хранения ОТВС.

ТУК-137Т.Р отличается от ТУК-137Т.А1 геометрией оребрения внешнего корпуса. Дело в том, что ТУК-137Т.Р создавали уже после начала строительства новых блоков с реакторами ВВЭР-1200 на Ленинградской и Нововоронежской АЭС. На блоках ВВЭР в бассейнах выдержки, где хранятся ОТВС после выгрузки из реактора, расположены специальные колодцы. Туда устанавливается ТУК, затем в него под водой подводятся и размещаются сборки, затем ТУК извлекается, вода сливается, а ТУК отправляется дальше на транспортировку. В колодцах российских и белорусской АЭС по проекту были сделаны антисейсмические ребра, которые защитили бы облицовку ТУКа от колебаний при гипотетическом землетрясении или внешнем воздействии. Такое решение подходит для контейнера ТУК-13, имеющего гладкую (без оребрения) внешнюю поверхность. На «Аккую» и других зарубежных станциях пошли другим путем: ребра в колодцы устанавливать не стали. Для семейства ТУК-137 при гипотетическом контакте ТУКа с облицовкой поверхности колодца защитную функцию выполнит внешнее оребрение корпуса самого ТУКа. Ребра будут защищать и колодец, и комплект от повреждений, если возникнут колебания.

Такое решение позволило увеличить площадь ребер, что важно для АЭС, расположенных в странах

### Цифры

**до 350 °С**

может составлять температура на оболочках твэлов в ТУКах

**до 85 °С**

температура на легкодоступных поверхностях ТУКа

**9 м**

высота падения, которую выдерживает ТУК



#### На фото

Развитое оребрение корпуса ТУКа обеспечивает эффективность системы теплоотвода, что важно для АЭС, расположенных в странах с жарким климатом

с жарким климатом. «Отвод тепла — одна из ключевых функций контейнера. Температура ТВС не должна быть выше 350 °С на поверхности тепловыделяющей сборки, загруженной в контейнер, и не выше 85 °С на поверхности контейнера. Эффективность системы теплоотвода обеспечивается развитым оребрением корпуса контейнера, где каждое ребро отводит тепло во внешнюю среду. Отвод тепла существенно проще организовать в прохладных условиях России или Беларуси, но значительно сложнее в условиях жаркого климата Турции, Бангладеш или Китая, где температура в некоторые периоды может превышать +50 °С», — объясняет Игорь Гусаков-Станюкович.

ТУК для АЭС «Аккую» изготовили на заводе «Русполимет». ТУКи для российских АЭС делали два российских предприятия в кооперации: «Энерготекс» изготовил корпус, а «Русполимет» выемную часть (чехол).

Чтобы улучшить экономические характеристики контейнеров и оборудования для обращения с ними, инженеры провели большую работу по типизации и унификации ключевых конструкторских решений. Это не красивые слова: реакторные здания АЭС с реакторами ВВЭР-1200, спроектированные двумя проектными институтами Росатома, отличаются в способах подачи ТУКа: на одних блоках они перемещаются в гермообъем горизонтально, на других — вертикально, поэтому пришлось с точностью буквально до миллиметра выверять геометрические параметры контейнера. Наличие унифицированных контейнеров существенно облегчит их эксплуатацию в будущем при массовом вывозе ОЯТ с АЭС с реакторами ВВЭР-1200/1300 на ПО «Маяк» и Горно-химический комбинат.

#### Перспективы

Для перевозки контейнеров нужны специальные транспортеры — железнодорожные платформы с устройствами для безопасного размещения ТУКов. Для мультимодальных перевозок нужны специализированные суда. Чтобы снизить затраты на транспортировку, специальный эшелон надо составлять из восьми ТУКов. Чтобы накопить такое количество, требуется несколько лет. На блоках с реакторами ВВЭР-1200 с 18-месячным топливным циклом за одну перегрузку заполняется четыре контейнера. Поскольку за рубежом Росатом строит АЭС, состоящие из двух или четырех блоков, которые будут останавливаться на планово-предупредительный ремонт и перегрузку топлива в разное время (потому что надо обеспечивать непрерывность энергообеспечения), требуется около трех лет для того, чтобы накопить восемь контейнеров, и еще год — на доставку ОЯТ с площадки АЭС на место хранения или переработки. Поэтому ТУК-137Т.А1 должен, по расчетам АО «Техснабэкспорт» обеспечивать безопасное хранение и транспортировку ОТВС в течение трех-пяти лет. Такой период называют транзитным хранением. «Для АЭС, расположенных за рубежом, мы в настоящее время обосновываем возможность транзитного хранения,

чтобы можно было формировать транспортно-судовые партии. В этой связи для двухблочной АЭС потребуется парк минимум из 16 контейнеров, для четырехблочной — из 24. К эксплуатации контейнеров с учетом транзитного хранения предъявляются более высокие требования по внутренней газовой среде, остаточному содержанию влаги, радиационной и термической стойкости прокладок, обеспечивающих герметичность контейнера», — говорит Игорь Гусаков-Станюкович.

Также АО «Техснабэкспорт» прорабатывает с заказчиками варианты технических решений для длительного хранения ОЯТ. Это следствие политики отложенного решения, принятой некоторыми странами в отношении ОЯТ. Сейчас срок длительного хранения оценивается в 60 лет и уже массово обоснован в решениях зарубежных компаний. Если для длительного хранения использовать контейнер вместимостью 18 ОТВС (как ТУК-137Т.А1), то для двухблочной АЭС потребуется порядка 340 контейнеров, для четырехблочной — порядка 680 ТУКов. Чтобы снизить затраты на организацию длительного хранения, АО «Техснабэкспорт» разрабатывает контейнеры повышенной вместимости. Таким же путем идут и иностранные конкуренты. При вместимости, например, в 30 ОТВС на контейнер, требуется около 200 контейнеров для двухблочной АЭС и около 400 — для четырехблочной. Количество ТУКов может меняться при изменении топливных циклов (12-/18-месячные циклы или иные).

Конструкция упаковок контейнерного хранения повышенной вместимости (УКХ ПВ) проще, так как они не будут испытывать механические и химические нагрузки, возникающие при многократных транспортировочных операциях и дезактивации. «Не надо защищать корпус от дезактивирующих растворов, не нужны резиновые прокладки — можно использовать заварку для создания герметичных барьеров, нижний слив тоже может быть исключен из конструкции. Плюс серии ТУКов для хранения больше, поэтому выгоднее становится не сборный корпус, а цельнолитой, который при большой серии делать дешевле», — объясняет Игорь Гусаков-Станюкович. Планируется, что во второй половине 2024 года пройдет сначала экспериментальная, а затем опытная отливка заготовки корпуса УКХ ПВ с массой жидкого металла свыше 120 тонн.

«Генеральная линия формирования продуктового предложения для зарубежных АЭС — сбалансированный ядерный топливный цикл, предусматривающий не только длительное хранение ОЯТ. Основа концепции обращения с ОЯТ как российских, так и зарубежных АЭС — своевременный вывоз и переработка ОЯТ с вовлечением регенерированных ядерных материалов в ядерный топливный цикл. В этом случае решения по обращению с ОЯТ не переключаются на плечи будущих поколений, а реализуются уже сейчас, с учетом целей устойчивого развития», — говорит Игорь Гусаков-Станюкович. Расчеты показывают, что упаковок потребуется примерно в пять раз меньше,

#### Цифры

## 800 °С

в течение не менее 30 минут выдерживает ТУК, сохраняя целостность конструкции и содержимого

## > 100 контрольных точек

проверила комиссия во время приемки ТУК-137Т.А1

## ~ 120 тонн

масса ТУКа с ОТВС реактора ВВЭР-1200

если ОЯТ АЭС будет переработано, а применение технологий фракционирования радиоактивных отходов и «дожигание» наиболее токсичных долгоживущих элементов не потребует захоронения отходов от переработки ОЯТ в глубоких геологических формациях.

Сейчас на базе модели ТУК 137Т.А1 разрабатывается документация на ТУК-137Т.Е, который станет унифицированным решением для зарубежных АЭС с реакторами ВВЭР-1200.

«Для каждой АЭС вопрос с обеспечением ТУКа будет решаться, исходя из принятых на государственном уровне решений по заключительной стадии ядерного топливного цикла — перерабатывать или хранить. Главное, что у нас уже сейчас есть современное решение для транспортировки ОЯТ на базе семейства ТУК-137Т. Решения для длительного хранения ОЯТ, с учетом современных вызовов и жесткой конкуренции с иностранными поставщиками, нам еще предстоит создать. Мы над этим активно работаем. Нельзя допустить повторения ситуации, когда практически на всех зарубежных АЭС, построенных Советским Союзом, появились системы западных фирм для хранения ОЯТ. Важно понимать, что контейнерные технологии обращения с ОЯТ — лишь малая часть решений по обращению с ОЯТ, которых ждет рынок. Нужны принципиально новые решения, технически проработанные и экономически обоснованные для эксплуатирующих организаций, а также экологически и социально приемлемые для общества. В этом мы видим свой вклад в развитие и масштабирование ядерных технологий. Впереди у нашего коллектива еще очень много работы», — подытожил Игорь Гусаков-Станюкович.

**Фото:** газета «Страна Росатом / Алексей Башкиров, Белоярская АЭС, АО «СХК»

На международном форуме «Атомэкспо-2024» Росатом представил проект энергоблока с реактором БН-1200М, который может стать основой для серийных систем поколения IV



## Подрастающее поколение

*Развитие перспективных технологий ядерных энергетических систем*

Огромный потенциал ядерной энергетики, которая может обеспечивать устойчивое и надежное энергообеспечение без выбросов парниковых газов, признан международным сообществом. Ожидается, что атомные станции будут играть важную роль в удовлетворении растущих глобальных энергетических потребностей, и все большее число стран оценивает возможное использование энергии атома в будущем.

Эволюция ядерных энергетических технологий насчитывает несколько поколений. Большинство эксплуатирующихся в настоящее время АЭС относятся к поколению II, реакторы поколения III/III+ работают и строятся с конца XX века. Разрабатываемые ядерные энергетические системы поколения IV обещают дать атомной генерации новые преимущества с учетом экономических, экологических и социальных требований и вызовов XXI века. В этих системах используются передовые технологии для улучшения характеристик реакторов и топливных циклов по сравнению с действующими. Кроме того, системы поколения IV ориентированы на новые применения ядерной

энергии, такие как технологическое теплоснабжение, опреснение воды, производство водорода.

К технологиям четвертого поколения относятся в том числе системы на базе реакторов на быстрых нейтронах с натриевым и со свинцовым теплоносителем. Наша страна является признанным лидером в этой области: на Белоярской АЭС успешно эксплуатируются натриевые реакторы, а в Северске на площадке СХК в рамках проекта «Прорыв» впервые в мире строится опытно-демонстрационный энергокомплекс с инновационным свинцовым реактором БРЕСТ и модулями по производству ядерного топлива и по переработке облученного топлива, обеспечивающими пристанционный замкнутый топливный цикл. Из недавних новостей проекта: в апреле 2024 года Росатом получил лицензию Ростехнадзора на эксплуатацию модуля по производству ядерного топлива для реактора БРЕСТ.

Эксперты рассказывают об основных характеристиках и мировых перспективах разработки и внедрения систем поколения IV.

## «Основное отличие реакторов поколения IV сконцентрировано в более широкой постановке требований, инициированной идеями устойчивого развития»

У понятия «поколение IV» в атомной энергетике существует два измерения. Первое — традиционное, для обозначения новизны модели. С поправкой на то, что ядерные реакторы — это не автомобили, модельный ряд которых обновляется ежегодно, а гораздо более инерционные системы. Реакторы поколения I создавались в 1960-е годы, характеризовались неприемлемой с позиций сегодняшних дней аварийностью и сейчас в основном уже выведены из эксплуатации. Реакторы поколения II продолжают эксплуатироваться. Реакторы поколения III и III+ сооружаются и будут эксплуатироваться еще много десятилетий. А вот дальше будет поколение IV.

Второе измерение — это наименование международного форума, который функционирует уже более 20 лет и в который входят более 10 стран, в том числе Россия. Это не кооперация стран, благодаря которой ведутся работы по сооружению реактора, как, например, термоядерного (ИТЭР), а, скорее, дискуссионный клуб, в котором делятся результатами исследований и разработок. В рамках этих дискуссий произошел отбор шести перспективных направлений, среди которых доминируют реакторы на быстрых нейтронах.

Основное отличие реакторов поколения IV от современной атомной энергетики сконцентрировано в более широкой постановке требований, инициированной идеями устойчивого развития. В итоге они стали основой для взаимосвязанной системы принципов, объединяющих, в частности, экономичность, безопасность, надежность, нераспространение, защищенность от террористических актов.

Понятно, что идеи устойчивого развития вынуждают рассматривать не только сами конструкции ядерных реакторов, но и вопросы топливообеспечения, замыкания ядерного топливного цикла и производства водорода. При этом и требования к глубине рассмотрения всех этих вопросов также повышаются. Так появилось понятие «коды нового поколения» (от английского code — «компьютерная программа») — это новое расчетное программное обеспечение, которое позволит более глубоко анализировать всю совокупность процессов, сопровождающих как нормальную эксплуатацию реакторов, так и нарушения в их работе, в том числе в условиях тяжелых аварий. Разработка таких кодов является новой и интересной работой, в которой активное участие принимают специалисты ИБРАЭ РАН.

В рамках Международного форума поколения IV было заключено Рамочное соглашение 2005 года, которое формально обязывает участников вести разработку одной или нескольких систем четвертого поколения из шести отобранных. Поэтому развитие технологий

четвертого поколения уже давно вышло за рамки конкурса концептуальных идей и стало предметом глубоких исследований, технологических и конструкторских разработок и осмысления бизнес-проектов, которые на этой основе могут быть сформированы. В этом отношении примечателен факт присоединения к международному форуму в 2019 году первой частной компании. Это канадская Terrestrial Energy, увлеченная идеей создания реактора на расплаве солей.

В этих разработках Россия занимает лидирующее положение. Причем это лидерство не только в прошлом, в котором есть длительная эксплуатация реакторов БН-350, БН-600 и БН-800, но и в предложении конструкции конкретного ядерного реактора. Оно тоже есть, реализуется и материально осязаемо для всех участников проектного направления «Прорыв», для которых есть графики выполнения работ, в том числе по сооружению реактора БРЕСТ-300. Но есть и более широкое осмысление облика атомной энергетики будущего, закрепленное в стратегии развития двухкомпонентной атомной энергетики России в XXI веке. Эта долгосрочная стратегия детально прорабатывалась. В целях ее обеспечения и развития уже в 2023 году начаты работы над стратегической программой по радиохимии, которая должна сформировать необходимый потенциал компетенций, кадров, исследовательской базы и промышленных технологий по переработке ОЯТ и других новых производств, которые обеспечат реальное замыкание ЯТЦ, максимальное использование делящихся материалов и минимизацию образования РАО.



**Игорь Линге**

Доктор технических наук, советник дирекции ИБРАЭ РАН

### Справка

**Международный форум поколения IV (МФП), или Generation IV International Forum (GIF),** — совместная инициатива, которая направлена на развитие исследований, необходимых для проверки осуществимости и эффективности ядерных систем поколения IV. Девять членов-учредителей подписали Хартию GIF в июле 2001 года: Аргентина, Бразилия, Канада, Франция, Япония, Южная Корея, ЮАР, Великобритания и США. Впоследствии Хартию GIF подписали Швейцария в 2002 году, Евратом (организация, представляющая общие интересы 27 стран Евросоюза, считается стороной, приравненной к государствам-участникам) в 2003-м, а также КНР и РФ в 2006 году. В 2016-м Хартию подписала Австралия, став 14-м членом. 12 членов (кроме Аргентины и Бразилии) подписали или присоединились к Рамочному соглашению GIF, которое устанавливает системный и проектный организационные уровни для дальнейшего сотрудничества.



**Марина Хвостова**

Кандидат географических наук, доцент, начальник отдела экологии, радиационной и промышленной безопасности, и.о. завкафедрой АЭС ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

## «Ядерные энергетические системы поколения IV — это качественно новый скачок развития атомной энергетики»

За 70-летнюю историю своего существования атомная энергетика прошла большой эволюционный путь. Ядерные энергетические установки, спроектированные и введенные в эксплуатацию на разных этапах развития атомной отрасли, классифицируются по поколениям.

Реакторы поколения I — ранние опытные образцы энергетических реакторов с различными видами теплоносителей. Это поколение энергетических реакторов продемонстрировало и позволило отработать технологии получения электрической энергии из энергии деления ядер посредством преобразований в тепловом цикле. На основе первых проектов были построены и эксплуатировались некоторые прототипы АЭС.

Реакторы поколения II — коммерческие реакторы, построенные до конца 1990-х годов, являются дальнейшим развитием реакторов поколения I. Они окупаемые и достаточно надежные. При их проектировании применялся консервативный подход, основным критерием безопасности был огромный запас по всем параметрам работы ядерной установки.

Реакторы поколения III — ядерные реакторы, появившиеся в результате эволюции реакторов поколения II. Характерными чертами этих реакторов являются более высокая топливная эффективность, улучшенный тепловой КПД, значительное усовершенствование системы безопасности (включая пассивную ядерную безопасность) и стандартизация конструкции для снижения капитальных затрат и затрат на техническое обслуживание. Улучшенная версия поколения III — реакторы поколения III+. Они предлагают повышение безопасности по сравнению с конструкциями реакторов поколения III, стремясь решить три ключевые задачи: безопасность, снижение стоимости и новые технологии сборки. В настоящее время большинство находящихся в эксплуатации реакторов во всем мире относятся к реакторам поколения II, поскольку

подавляющее большинство систем поколения I были выведены из эксплуатации, а число реакторов поколения III и III+ по состоянию на 2024 год незначительно.

Международный форум поколения IV (GIF) отобрал шесть реакторных технологий в качестве перспективных. Поскольку к ним предъявляются требования, отвечающие вызовам современного развития общества, а именно возможность устойчивого развития, малотходность, конкурентоспособность в промышленных масштабах, не ограниченная на длительный период времени сырьевой базой, безопасность (надежность) и защита от несанкционированного распространения ядерных материалов, то корректнее уже говорить не о ядерных реакторах, а о ядерных энергетических системах поколения IV. В эту систему, помимо ядерной энергетической установки, также входят блоки переработки облученного топлива и фабрикация нового топлива. Ядерные энергетические системы поколения IV — это качественно новый скачок развития атомной энергетики. Они позволяют получать электрическую и тепловую энергию, безопасно эксплуатировать энергоблоки и замкнуть ядерный топливный цикл.

Весь мировой опыт проектирования и эксплуатации реакторов — это уже в некоторой степени тот научно-технический задел, который делает возможным реализацию ядерных энергетических систем четвертого поколения. Однако из шести выбранных GIF реакторных технологий только технология реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем имеет значительный и, что немаловажно, положительный опыт проектирования, сооружения и эксплуатации и может быть реализована в рамках энергетических систем поколения IV в ближайшие годы.

Еще одна технология — высокотемпературных газовых реакторов — признана перспективной. Высокотемпературный атомный реактор с газовым охлаждением HTR-PM был разработан специалистами Университета Цинхуа в качестве более безопасной альтернативы реакторам с водяным охлаждением.

Россия, несомненно, является лидером мирового рынка ядерных технологий нового поколения. Работы ведутся сразу в нескольких направлениях.

Технология быстрых реакторов разрабатывается в России с 1950-х годов. Реакторы БР-5/10, БОР-60, БН-350, БН-600, БН-800, в разное время выполнявшие и выполняющие свои задачи, показали эффективность и перспективность такого типа ядерных установок. В настоящее время достаточно глубоко проработан проект реактора БН-1200М, который может быть использован в ядерных энергетических системах четвертого поколения. БН-1200М — основа для серийных быстрых натриевых реакторов.

Активная зона БН-800 полностью переведена на уранплутониевое МОКС-топливо. Сырьем для его производства выступают оксид плутония, получаемый при переработке ОЯТ традиционных реакторов ВВЭР, и оксид обедненного урана



На территории СХК возводится опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК) в составе энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем и замыкающего ядерный топливный цикл пристанционного завода, включающего модуль переработки облученного смешанного уранплутониевого (нитридного) топлива и модуль фабрикация/рефабрикация для изготовления стартовых ТВЭЛов из привозных материалов, а впоследствии ТВЭЛов из переработанного облученного ядерного топлива. ОДЭК впервые в мире должен продемонстрировать устойчивую работу полного комплекса объектов, обеспечивающих замыкание топливного цикла.

Еще один проект — строительство энергоблока с инновационным водо-водяным реактором со спектральным регулированием (ВВЭР-С). Применение системы спектрального регулирования имеет целый ряд преимуществ. При той же мощности такой реактор потребляет на 30% меньше урана. Даже в условиях открытого ЯТЦ это поможет сэкономить запасы урана. Кроме того, спектральное управление позволяет загрузить в легководный реактор активную зону, полностью состоящую из МОКС-топлива. Также анализ энергоблоков поколения III+ показал, что затраты на строительство блоков с ВВЭР-С могут быть на 10–15% ниже по сравнению с затратами на блоки с ВВЭР-1200.

### Справка

Для ядерных энергетических систем поколения IV определены технологические цели в четырех широких областях:

- **устойчивость:** стабильное производство чистой энергии с эффективным использованием топлива, а также сведение к минимуму образования отходов и улучшение за счет этого защиты здоровья населения и окружающей среды;
- **экономика:** преимущество в стоимости на всем жизненном цикле по сравнению с другими источниками энергии, а также уровень финансового риска, сравнимый с другими энергетическими проектами;
- **безопасность и надежность:** очень низкая вероятность и (в случае возникновения) низкая степень повреждения активной зоны реактора, отсутствие необходимости экстренного реагирования за пределами площадки;
- **гарантии нераспространения и защита:** сложность доступа к материалам, пригодным для изготовления оружия, и повышенная физическая защита от террористических актов.

### Справка

GIF выбрал шесть реакторных технологий для дальнейших исследований и разработок:

- быстрый газоохлаждаемый реактор;
- быстрый реактор со свинцовым теплоносителем;
- реактор на расплавленной соли (жидкосолевой реактор);
- сверхкритический водоохлаждаемый реактор;
- быстрый реактор с натриевым теплоносителем;
- высокотемпературный реактор.





**Сергей Капитонов**

Эксперт  
Проектного центра  
по энергопереходу  
Сколтеха

## «Россия, безусловно, является мировым лидером в разработке реакторов поколения IV»

Под реакторами четвертого поколения необходимо понимать систему характеристик как самого реактора, так и сопутствующих процессов ядерного цикла, невиданную ранее на реакторах прежних поколений. К необходимым характеристикам относят высокие показатели эффективности эксплуатации реактора (топливная эффективность, тепловой КПД), безупречные стандарты безопасности, возможность работы в условиях замкнутого цикла (то есть возможность задействовать переработанное ОЯТ в новых топливных сборках) и т. д.

Строго говоря, сегодня в мире ни один коммерческий реактор не соответствует всем предъявляемым для реакторов четвертого поколения требованиям. Однако существуют проекты реакторов (на разных стадиях реализации), которые по завершению можно будет по праву называть реакторами четвертого поколения. В России это реактор на быстрых нейтронах БН-1200, который планируется к сооружению на площадке Белоярской АЭС на горизонте 2032–2035 годов, и экспериментальный реактор БРЕСТ, строящийся в Северске. Из зарубежных примеров работ над реакторами четвертого поколения можно отметить построенные на АЭС «Шидаовань» в Китае высокотемпературные реакторы с газовым охлаждением. Это демонстрационные реакторы с высокими стандартами безопасности, низким потреблением топлива, высоким КПД. Эти реакторы, однако, пока не вышли за рамки демонстрационных и обладают относительно невысокой мощностью.

Что касается предшественников реакторов четвертого поколения, то НИОКР и демонстрационные проекты реализовывались в ряде зарубежных стран (Франция, США, Япония) как в формате тепловых реакторов, так и в формате реакторов на быстрых нейтронах. Однако до серийных образцов, полностью соответствующих требованиям нового времени, дело не дошло.

Россия, безусловно, является мировым лидером в разработке реакторов поколения IV. Целый ряд ноу-хау, необходимых для нового поколения энергоблоков, был отработан на реакторах БН-600, БН-800 на Белоярской АЭС, в частности возможность использования МОКС-топлива (продукта переработки ОЯТ), системы безопасности (пассивный отвод тепла, системы аварийного расхолаживания) и т. д. Принципиально новые схемы работы реакторов будут отрабатываться на реакторе БРЕСТ (реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем).

На фоне энергетического перехода и ставки ряда государств на снижение зависимости от углеводородов именно атомная энергетика может обеспечить базовую генерацию в энергосистеме. Если с помощью реакторов поколения IV атомная промышленность даст ответы на вопросы безопасности и поможет преодолеть ограничения ресурсной базы, то амбициозные прогнозы ведущих аналитических агентств о повышении роли мирного атома в мировом энергобалансе имеют все шансы сбыться.



**Сергей Роженов**

Директор группы  
аналитики  
в энергетике Kept

## «Развитие технологий поколения IV будет способствовать позиционированию энергии атома как безопасного и устойчивого решения для энергетики будущего»

Четвертое поколение атомных реакторов — довольно широкое понятие современных технологий атомной генерации, находящихся в стадии разработки и опытной эксплуатации. Эти разработки призваны решить как вопросы технологического характера, связанные с топливной эффективностью, безопасностью и другими «потребительскими» качествами АЭС, так и во все возрастающей мере вопросы маркетинга и позиционирования в общественном сознании новой атомной энергетики как части устойчивой и низкоуглеродной энергетики будущего.

С технологической точки зрения сам термин «поколение IV» введен в 2001 году организацией Международного форума поколения IV (Generation IV International Forum, GIF), определившей шесть классов перспективных атомных технологий, в первую очередь связанных с использованием неводных

теплоносителей (абсолютное большинство из 410 реакторов, работающих в мире на сегодня, используют воду как теплоноситель и технологическую жидкость, отвечающую за поддержание цепной реакции деления урана), таких как расплавы солей, свинец и системы газообразного охлаждения.

Все эти технологии так или иначе направлены на решение трех основных технологических задач. Во-первых, существенно повысить температуру теплоносителя на выходе из реактора свыше традиционных 270–300 °С до 550 °С и даже до фантастических на сегодня 850 °С для самых «продвинутых» газовых реакторов. Повышение температуры теплоносителя позволит использовать АЭС не только для выработки электроэнергии и обеспечит возможность замещения высокотемпературных процессов в промышленности, таких как, например, высокотемпературный

Площадка строительства ОДЭК с инновационным реактором четвертого поколения БРЕСТ-ОД-300



электролиз воды. Во-вторых, тот же самый подъем температуры в реакторах поколения IV должен обеспечить существенный рост электрического КПД с 30–35% до 42–45% и, соответственно, топливной эффективности за счет перехода к так называемым сверхкритическим параметрам пара. В-третьих, ряд технологий четвертого поколения обеспечивают замыкание топливного цикла, когда реактор становится способным производить больше топлива, чем в него было загружено. Никакого чуда здесь нет: все дело в природном составе уранового топлива, где доля «годного» для атомной реакции урана-235 менее 1%, в то время как основную массу составляет уран-238. Этот «беспольный» уран может быть преобразован в плутоний в специальных реакторах-бридерах и затем снова запущен в топливный цикл.

Последние два качества реакторов четвертого поколения являются наиболее значимыми. В условиях ожидаемого атомного низкоуглеродного ренессанса для обеспечения кратного наращивания атомных мощностей в мире обеспечение даже не цены, а просто массовой доступности ядерного топлива становится краеугольным камнем развития отрасли, а также принятия политических решений по входу в клуб стран, использующих атомную энергетику, новых игроков на международной арене.

Здесь мы приходим к решению нетехнических задач технологического развития атомной отрасли. Кроме всего прочего, развитие технологий четвертого поколения будет параллельно способствовать решению не менее важной задачи нового позиционирования энергии атома как безопасного и устойчивого решения для энергетики будущего, не менее интересного для общества, чем зеленая энергетика (ВИЭ и водородные технологии).

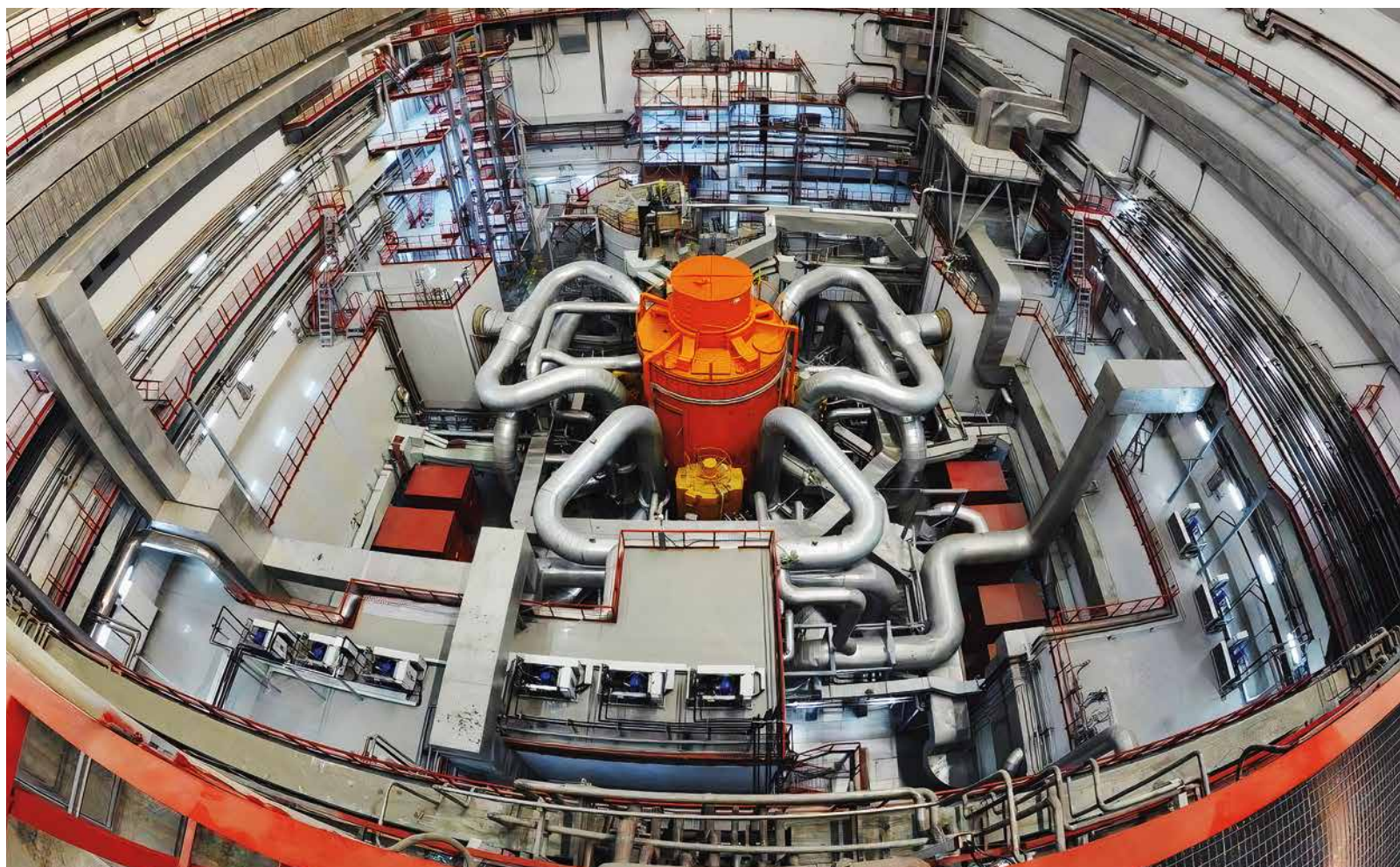
Несмотря на то что и реакторы поколения III+ технически высоконадежны, они воспринимаются и в общественном сознании, и в инструкциях по безопасности совершенно определенным образом, как нечто, требующее удаления от агломераций.

Переход на неводные теплоносители (пока в теории) обеспечивает существенный рост безопасности, так как основной корпус реактора, работающего, например, на расплаве солей, работает без давления, соответственно, его разгерметизация может быть локализована гораздо проще и в меньшей зоне. Новое позиционирование реакторов поколения IV позволяет приблизить станции к городам и промышленным объектам и расширить возможности их применения.

С учетом этих новых возможностей позиционирования атомное сообщество вот уже несколько лет проводит системную работу по созданию нового образа «пользовательского опыта» для новых атомных стран. В первую очередь это относится к включению АЭС в процессы энергопланирования, например, в рамках совместной инициативы МАГАТЭ и IRENA по разработке континентального плана развития энергетики — Africa Continental Power System Masterplan, реализованного в 2021–2023 годах. АЭС рассматривается как органичный элемент архитектуры низкоуглеродной энергетики с понятным рынком сбыта продукции на десятилетия вперед. Большая определенность рынков сбыта энергии АЭС создает предпосылки для включения этих капиталоемких проектов в «устойчивые» таксономии национальных и международных финансовых институтов наряду с прокаченными ВИЭ, что обеспечит тот самый атомный ренессанс за счет привлечения негосударственных финансов в отрасль.

Развитие атомных технологий российского дизайна в целом идет в фарватере международной повестки. Очевидно, что основной объем рынка и производства энергии на ближайшие десятилетия будут нести технологии поколения III+, такие как бестселлеры международного рынка — блоки ВВЭР-1200, в то же время будет вестись разработка технологий поколения IV с фокусом российского подхода на замыкание топливного цикла и масштабирование технологий типа БН-800 и БРЕСТ, а также на систематическое позиционирование традиционных и новых АЭС как части будущего энергетики планеты.

Наиболее развитым направлением реакторных технологий, которые относятся к поколению IV, являются натриевые реакторы на быстрых нейтронах. БН-800, помимо производства электроэнергии, обеспечивает отработку технологии замкнутого ядерного топливного цикла в промышленных масштабах



**Георгий Тихомиров**

Заместитель директора Института ядерной физики и технологий НИЯУ «МИФИ»

### «Новые технологии позволят вывести безопасность применения атомной энергетики на новый уровень и расширить топливную базу»

Сформулировано несколько концепций поколений атомных реакторов. Первое поколение — это фактически экспериментальные установки, к которым относится наша первая АЭС. Второе поколение — это коммерческие аппараты, которые начали эксплуатироваться в разных странах во время бурного роста атомной энергетики и интереса к ней. В 1960–1970-х годах пускалось по 30 блоков в год. Но потом вскрылись некие недоработки, произошли аварии на АЭС в Три-Майл-Айленде в США, в Чернобыле. Анализ причин этих аварий позволил сформулировать решения, которые было необходимо принять для их предотвращения, что позволило появиться реакторам третьего поколения. Но при этом у этих реакторов сохранились некоторые конструкционные ограничения, касающиеся применения только электрической энергии.

В 2000-х годах — после Фукусимы — появились факторы, позволяющие вывести безопасность применения атомной энергетики на новый уровень и решить проблемы нераспространения ядерных материалов.

И еще один концепт — расширить топливную базу с использованием замкнутого ядерного топливного цикла.

Стоит отметить, что сегодня эта концепция продвинулась еще и с точки зрения развития малой атомной энергетики, которая будет включать развитие малой атомной генерации в труднодоступных областях мира. Если сегодня реально посмотреть на развитие атомной энергетики, то разработки ведутся в разных областях. В России реализуется проект БРЕСТ-300, развиваются проекты высокотемпературных реакторов, жидкосольевых реакторов, сверхкритических водных реакторов. Похожие программы есть в Китае, например реактор на быстрых нейтронах CEFR, похожий на наш реактор БН-600, что тоже можно отнести к реакторам поколения IV, а также у них пущен высокотемпературный реактор. В других странах много бумажных проектов. В России два проекта — высокотемпературный реактор и БРЕСТ, от которого много зависит.

### «Принадлежность к следующему поколению должна стать наградой только тем типам будущих реакторов, чья ядерная безопасность будет доказана практикой»

Наиболее развитым направлением реакторных технологий, которые относятся к четвертому поколению, являются натриевые реакторы на быстрых нейтронах. Здесь Россия несомненный лидер, имеющий значительное опережение как в проектировании, сооружении, так и в эксплуатации этих реакторов. БН-1200М — основа создания серийных быстрых натриевых реакторов. Разработан технический проект реакторной установки серийного энергоблока, по безопасности соответствующего требованиям GIF. На совещании Управляющего совета по проектному соглашению Международного форума поколения IV по системной интеграции и оценке быстрого натриевого реактора в сентябре 2017 года концепция БН-1200 была принята и одобрена как отвечающая требованиям GIF, предъявляемым к реакторам на быстрых нейтронах поколения IV.

Распоряжением госкорпорации «Росатом» от 28 апреля 2022 года утверждена дорожная карта разработки предпроектной и проектной документации и сооружения энергоблока №5 Белоярской АЭС с реакторной установкой БН-1200. Основанием для рекомендации сооружения энергоблока как признания готовности технологии быстрых натриевых реакторов к коммерческому освоению стали результаты разработки материалов проекта энергоблока в рамках анализа его конкурентоспособности и технического проекта РУ. Понятие конкурентоспособности в настоящее время включает не только характеристики безопасности и надежности, но и в первую очередь технико-экономические показатели ядерных реакторных технологий на уровне показателей электростанций на органическом топливе при учете всех затрат на всех этапах их жизненного цикла, в том числе и замкнутого ядерного топливного цикла.

Энергоблок №5 БАЭС с БН-1200 находится на стадии проектирования. Площадка под новый блок уже определена, прошли общественные слушания по размещению. По дорожной карте планируется, что первый бетон в фундамент зальют в 2027 году.

Россия также имеет значительный задел в реализации проекта «Прорыв» с реакторной установкой БРЕСТ-300 со свинцовым теплоносителем. БРЕСТ-300 также относится к одной из шести реакторных технологий, выбранных экспертами GIF. Сооружение, пуск и освоение эксплуатации реактора БРЕСТ-300 в составе комплекса по переработке ОЯТ и фабрикации нового ядерного топлива являются необходимым этапом в реализации масштабной ядерной энергетики с быстрыми свинцовыми реакторами большой мощности — БР-1200.

В России, помимо быстрых натриевых и свинцовых реакторных технологий, есть заделы по другим

реакторным технологиям, отнесенным к четвертому поколению. Ведутся разработки по высокотемпературным газоохлаждаемым и жидкосольевым реакторам.

Реактор с расплавом солей, менее развитая технология, считается потенциально обладающим наибольшей пассивной безопасностью из шести моделей. В связи с развитием науки и техники некоторые проблемы жидкосольевых реакторов стало возможным разрешить, поэтому в последнее время появилось немало проектов реакторов такого типа.

Китайские СМИ в конце прошлого года сообщили о пуске первой в мире АЭС четвертого поколения — «Шидаовань» (в провинции Шаньдун) с двумя высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами с активной зоной с шаровыми микровзлами (HTR-PM). Я думаю, полноценно отнести данные реакторы к четвертому поколению преждевременно, поскольку в данном случае не решена одна из задач, поставленных GIF, которые необходимо решить для практической реализации этих шести технологий, а именно — преимущество в стоимости производимой энергии по сравнению с другими видами генерации на всем протяжении жизненного цикла.

Если говорить о более отдаленном будущем, то реакторы поколения V пока представляют собой только теоретические концепции, неосуществимые в краткосрочной перспективе, что приводит к ограниченному финансированию НИОКР.

В заключение я хотел бы процитировать заслуженного деятеля науки РФ, доктора технических наук, профессора Бориса Григорьевича Гордона. В одном из своих выступлений он сказал: «Энергетика будущего возможна совсем на других, пока неизвестных нам принципах, среди которых особенно заманчивым кажется прямое преобразование энергии деления в электричество. Принадлежность к следующему поколению должна стать наградой только тем типам будущих реакторов, чья ядерная безопасность будет доказана практикой».



**Олег Ташлыков**

Доктор технических наук, профессор, доцент УрФУ

### Справка

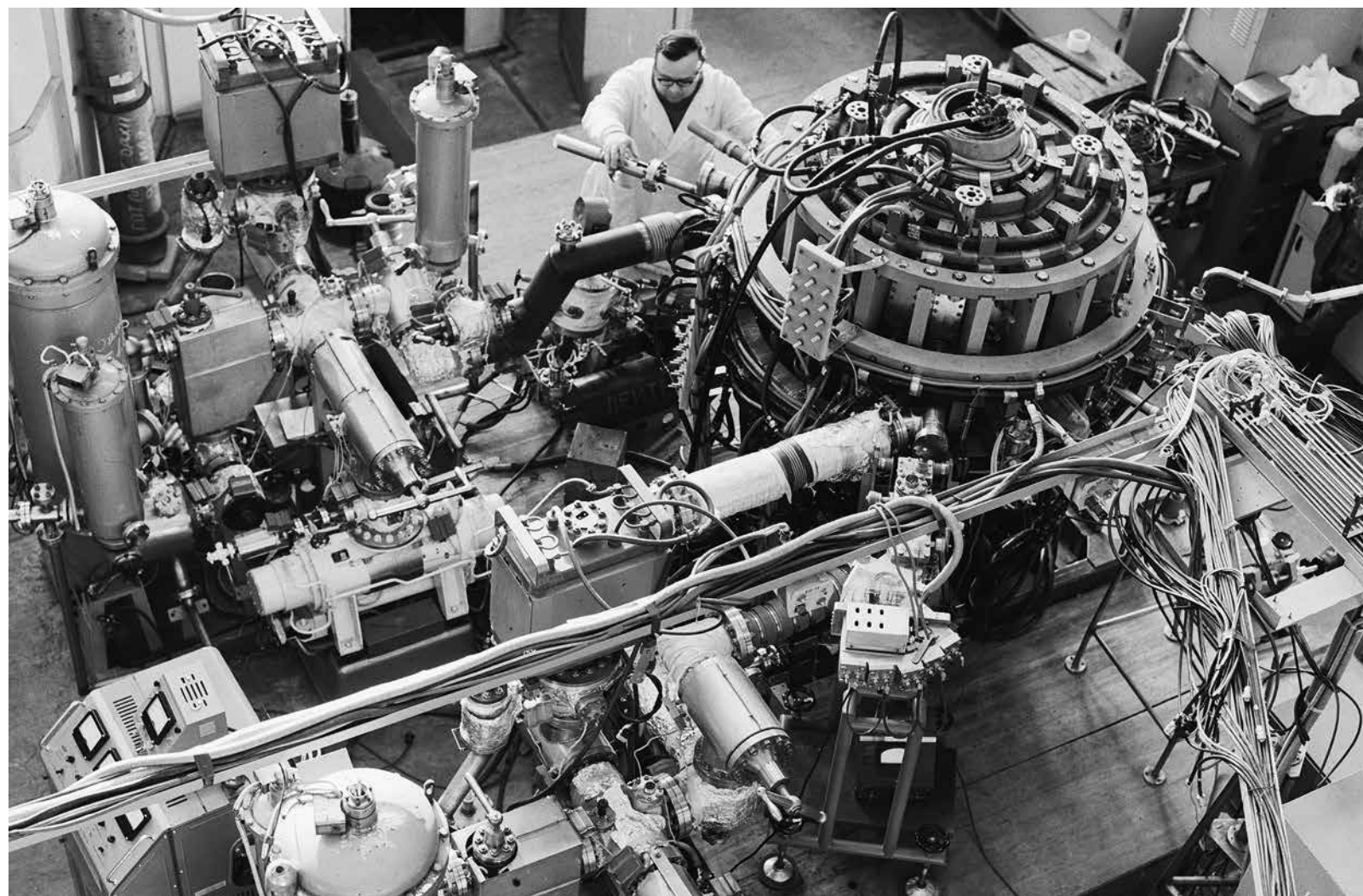
Все системы поколения IV нацелены на повышение производительности, новые применения ядерной энергии и/или более устойчивые подходы к обращению с ядерными материалами.

Текст: Наталия Фельдман  
 Фото: ТАСС / Альберт Пушкарев,  
 ИЯФ СО РАН / Сергей Мурахтин

Подготовка термоядерной установки «Токамак-12» к эксперименту  
 (Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова, 1976 г.)

# По следам тора: что скрывает термоядерный бублик?

Как физические открытия, научные разработки и новые технологии меняют язык



При изучении лексики атомной отрасли открывается целый кладезь интересных историй, которые с удовольствием слушают посетители различных мероприятий сети Информационных центров по атомной энергии (ИЦАЭ). Чем же они интересны слушателям? За каждой историей происхождения названия или термина стоят люди, которые с нуля создавали инновационные устройства, уникальные установки, надежные и безопасные технологии. Термоядерную энергетику можно назвать

следующим этапом развития атомных технологий: идею первого термоядерного реактора разрабатывали атомщики Андрей Сахаров и Игорь Тамм, а слово «токамак», придуманное учеными, из личного имени установки превратилось в нарицательное существительное и было заимствовано другими языками. Об истории происхождения названия «токамак» и других имен собственных и терминов, имеющих отношение к термоядерной энергетике, пойдет речь в этой статье.

## Письмо с Сахалина

«В 1950 году академики А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм предложили первую модель магнитного термоядерного реактора, положившую начало исследованиям по этой проблеме в Советском Союзе», — написал Игорь Курчатов в предисловии к сборнику иностранных статей об управляемом термоядерном синтезе<sup>1</sup>. И первое свое «имя» будущий токамак получил в виде аббревиатуры МТР — от словосочетания «магнитный термоядерный реактор».

Но началась эта история с письма, которое попало в секретариат Лаврентия Берии, ответственного за реализацию советского атомного проекта. Написал его советский физик Олег Лаврентьев, проходивший на тот момент срочную службу в Советской армии. В письме были изложены две идеи. Одна из них опиралась на схему устройства, благодаря которому можно было, по мнению автора, осуществить управляемую термоядерную реакцию.

«Летом 1950 года на объект пришло отправленное из секретариата Берии письмо с предложением молодого сержанта Олега Лаврентьева, служившего на Сахалине. Во вводной части автор писал о важности проблемы управляемой термоядерной реакции для энергетики будущего...», — так вспоминал об этом Андрей Сахаров<sup>2</sup>, которому поручили написать отзыв на письмо с анализом реальности изложенных идей. Сахаров схему, описанную Лаврентьевым, счел неосуществимой, но у него возникла идея магнитной термоизоляции плазмы, которую они разрабатывали вместе с Игорем Таммом.

Первую тороидальную установку, известную как ТМП (тор с магнитным полем), построили уже в 1955 году под руководством Игоря Головина и Натана Явлинского. Следующую установку назвали «Токамак» — сокращение от словосочетания «тороидальная камера магнитная»<sup>3</sup>, и Игорь Головин для благозвучности предложил заменить последнюю букву Г на К. В результате и полное название немного изменилось: «тороидальная камера с магнитными катушками». Вот так советский физик стал автором термина, получившего распространение в научном мире и сохранившего звучание во многих иностранных языках<sup>4</sup>. Слово «токамак» с точки зрения словообразования представляет собой смешанную аббревиатуру: первые слоги трех слов многословного словосочетания объединяются с начальным звуком четвертого слова.

Поскольку токамаки оказались эффективной конструкцией для удержания плазмы, «Токамак» из имени собственного превратился в нарицательное существительное, обозначающее любой термоядерный реактор с камерой тороидальной формы. Такой

процесс в лингвистике — переход имени собственного в имя нарицательное — называется деонимизацией.

## Путешествия тора

О международном проекте по созданию термоядерного реактора ИТЭР наверняка слышали многие. «Сердце» ИТЭР — это тот самый токамак. А аббревиатура ИТЭР — это транскрипция англоязычной аббревиатуры ITER, которая расшифровывается как International Thermonuclear Experimental Reactor (Международный экспериментальный термоядерный реактор). Если иноязычная аббревиатура становится широко распространенной в мировом масштабе, то она заимствуется другими языками без перевода. Вот так произошел международный лингвистический обмен: русский язык подарил другим языкам слово «токамак», а имя ИТЭР без изменения заимствовано нашим «великим и могучим». Кстати, личные имена материальных объектов, созданных человеком, в том числе атомных реакторов, космических аппаратов и других сложных механизмов, в лингвистике называются хрематонимами. Поэтому, например, меч Эскалибур и молот скандинавского бога Тора Мьельнир — лингвистические родственники «Аннушке», «Фениксу» и «Кьюриосити».

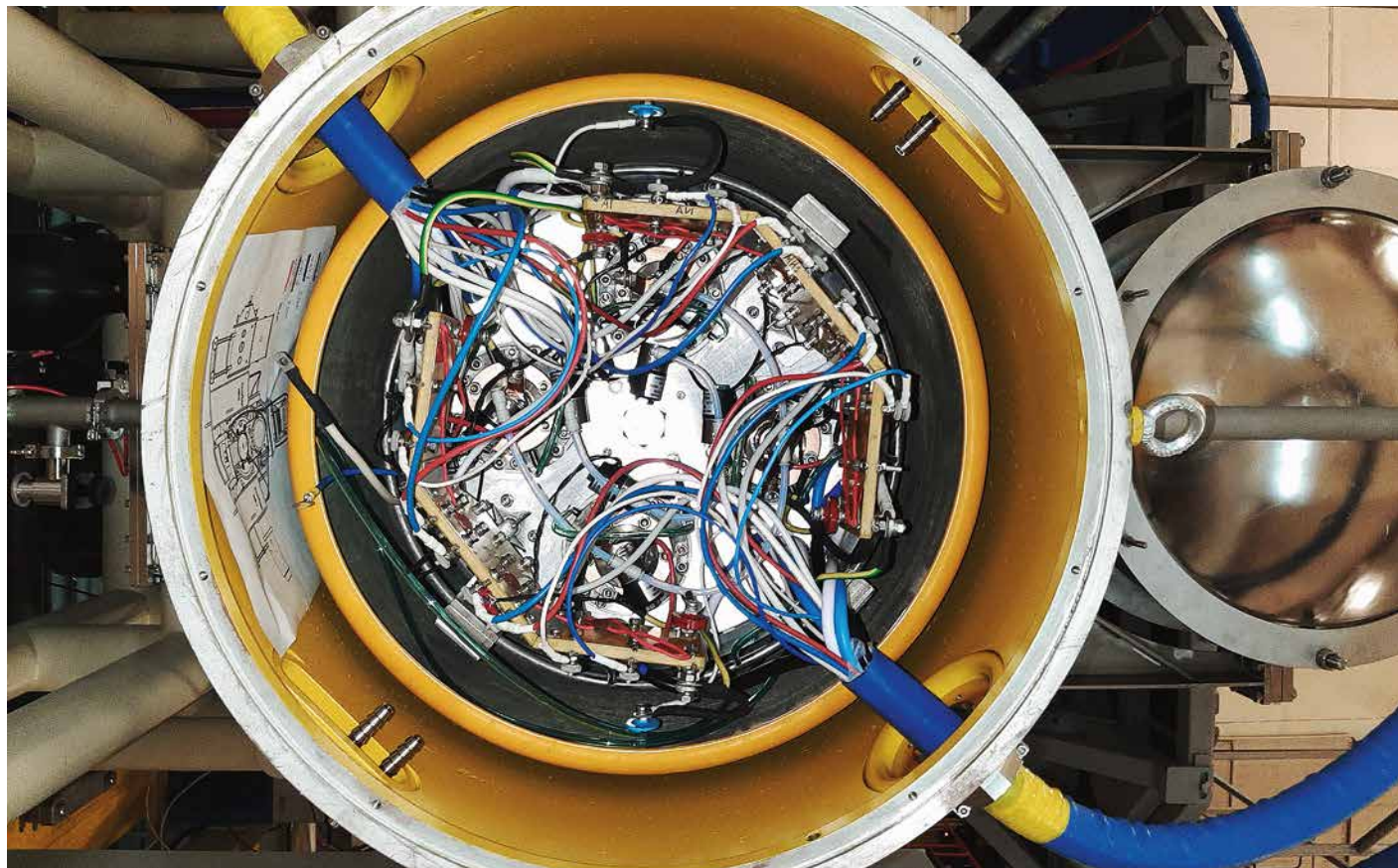
Но получение любым объектом личного имени нуждается в объяснении его происхождения — вспомните, насколько интересно было узнать, что означают ваши имя и фамилия. Поэтому в последнее время у аббревиатуры ИТЭР появилось дополнительное значение. Она созвучна с латинским существительным iter, что обозначает «путь»<sup>5</sup>. Изначально такой смысловой связи не было, но это очень удачная метафора: создание установки, способной удерживать плазму с температурой более 150 млн °С, такой же подвиг инженерно-технической мысли, как и создание первых атомных реакторов. И все страны-участницы проходят совместный путь по реализации этого масштабного проекта, создавая новые материалы и разрабатывая инновационные технологии.

Токамак, как мы уже отметили, имеет тороидальную форму. Интересно, что для объяснения значения этого математического термина в Большом толковом словаре Кузнецова приводятся очень простые и образные аналогии.

1. **ТОР**, -а; м. [от лат. torus — вздутие, выпуклость, узел]. Матем. Пространственная фигура, имеющая форму баранки или спасательного круга.
2. **ТОР**, -а; м. В скандинавской мифологии: бог грома и молнии, покровитель земледельцев<sup>6</sup>.

1. Управляемый термоядерный синтез: сборник переводных статей / [Предисл. акад. И. В. Курчатова] М.: Атомиздат, 1958. С. 7.  
 2. Азизов Э. А. Токамаки от А. Д. Сахарова до наших дней (60 лет токамакам) // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 2. С. 203.  
 3. Там же. С. 204.  
 4. <http://nrcki.ru/catalog/press-centr/pamyatnye-daty/biografi-v-pamyatnyh-datah/golovin-igor-nikolaevich/>  
 5. <https://www.iaea.org/ru/energiya-termoyadernogo-sinteza/iter-krupneyshiy-v-mire-eksperiment-po-termoyadernomu-sintezu>  
 6. <https://gufo.me/dict/kuznetsov/%D1%82%D0%BE%D1%80>

Сердце установки КОТ — инжектор нейтральных атомов



Об аналогии с именем скандинавского бога в случае с токамаком, то есть тором, конечно, речи не идет, хотя нашим современникам она может прийти на ум. Таково влияние лингвокультурологического пространства — скандинавские боги получили популярность благодаря современным фантастическим фильмам и сериалам, а одинаковое звучание имени мифологического персонажа, ставшего частью массовой культуры, и сложной математической фигуры приводит к соответствующим ассоциациям. И найти такие ассоциации очень легко: Тор повелевает молниями, то есть природным электричеством большой мощности, а термоядерный синтез тоже представляет собой природное явление, происходящее в недрах звезд, и при овладении управляемым термоядерным синтезом тоже можно будет получить электроэнергию. Но следует помнить, что это просто красивый ассоциативный ряд: разрабатывая токамак с камерой тороидальной формы, советские атомщики вряд ли думали о скандинавской мифологии.

### И здесь Тамм!

Еще один тип реактора для осуществления управляемого термоядерного синтеза называется стелларатором, и его название, по одной из версий, восходит к латинскому stella — «звезда». Но, по данным Большой российской энциклопедии, существительное «стелларатор» было образовано от английского прилагательного stellar — «звездный». А английское слово, в свою очередь, произошло от латинского stella.

В любом случае, авторы проекта хотели показать, что процессы, происходящие внутри устройства, очень похожи на термоядерный синтез в недрах Солнца и других звезд.

Изобрел стелларатор американский ученый-физик Лайман Спитцер в 1951 году. В основе стелларатора, как и токамака, лежит тор. Отличие заключается в расположении магнитных полей, из-за чего внутри стелларатора находится не «ровный бублик», как в токамаке, а «мятый»<sup>7</sup>.

Итак, магнитные силовые линии в стеллараторе многократно обходят тор, подвергаясь вращательному преобразованию, и в итоге получается система замкнутых тороидальных магнитных поверхностей, вложенных друг в друга. А впервые на принципиальную возможность существования таких поверхностей в магнитном поле указал Игорь Тамм еще в 1928 году, задолго до изобретения самой конструкции. В качестве примера ученый приводил кольцо с током, помещенное в тороидальное магнитное поле<sup>8</sup>.

### Звезда по имени... КОТ

В 2021 году в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН в Новосибирске была введена в эксплуатацию новая экспериментальная установка КОТ. Это тоже аббревиатура, образованная от словосочетания «компактный осесимметричный тороид»<sup>9</sup>. КОТ отличается от токамака и стелларатора конструкцией:

плазма находится не внутри «бублика», как в токамаке, а в «бутылке с двумя горлышками» — по сути, в открытом цилиндре, и после того как энергия выделится, отработанная плазма утекает через горлышки, а в вакуумную камеру поступает свежая порция плазмы. КОТ — экспериментальная установка, и объем плазмы в ней составляет всего 20 л. Вместо смеси дейтерия и трития в установке используется обычный водород. По физическим характеристикам он идеально подходит для экспериментов, и при этом не возникает необходимости организовывать хранение термоядерного радиоактивного топлива.

### Ядерный и термоядерный

Прилагательное «термоядерный» образовано с помощью начальной части сложного слова «термо-» и прилагательного «ядерный». В переводе с греческого *therme* означает «жара», «жар». Но ведь при ядерной реакции тоже происходит колоссальное выделение тепловой энергии! Видимо, весь вопрос в порядке температур. При делении тяжелого ядра — это тысячи градусов, а при слиянии легких ядер — уже миллионы. И часть основы «термо-» эту разницу подчеркивает.

Прилагательное «ядерный» возникло в языке, образовавшись от существительного «ядро», которое восходит к общеславянскому *endro* — «сердцевина, внутренняя часть чего-то», и в этом значении оно существует достаточно давно. А вот более привычный нам смысл прилагательное «ядерный» получило благодаря метафорическому переносу: когда ученые обнаружили, что атом не такой уж и неделимый, его сердцевину тоже начали называть ядром. Последовательность возникновения значений передана в словарной статье.

**ЯДЕРНЫЙ** -ая, -ое. 1. к Ядро (2, 4 зн.). Я-ая оболочка. Я-ая траектория. Я-ая вмятина. Я-ая часть клетки. 2. Относящийся к процессам, происходящим в атомном ядре, к использованию энергии атомного ядра. Я-ая реакция. Я-ое топливо. Я-ая энергия. Я-ое оружие. Я. взрыв. Я-ая катастрофа. Я. реактор (устройство, в котором осуществляется управляемая цепная реакция деления атомных ядер). Я-ая физика (раздел физики, в котором изучаются атомные ядра и их превращения). 3. Жарг. Чрезмерный, крайний в своем проявлении. Я-ые цены (очень высокие). Я. плащ (сверхмодный)<sup>10</sup>.

Мы видим, что у прилагательного «ядерный» есть и относительно новое значение, уже зафиксированное в словарях, а значит, ставшее частью языка: «чрезмерный, крайний в своем проявлении».

Стилистическая помета «жарг.» указывает на то, что в таком значении прилагательное «ядерный» пока что в кодифицированном, нормативном языке не употребляется, а в разговорном — запросто!

А вот у прилагательного «термоядерный» пока дополнительных значений не возникло, и это объясняется достаточно просто: для начала каждому слову нужно освоиться, прижиться в языке в его прямом значении, а уже позже могут появиться и дополнительные смыслы.

**ТЕРМОЯДЕРНЫЙ** [те] и [тэ], -ая, -ое. Основанный на столкновении ядер атома в их беспорядочном движении при сверхвысокой температуре; обусловленный этим столкновением. Т. взрыв. Т-ая энергия. Т-ая реакция (реакция слияния атомных ядер легких элементов в более тяжелые, происходящая при сверхвысоких температурах и сопровождающаяся выделением огромного количества энергии)<sup>11</sup>.

Зато появился сокращенный вариант, относящийся к прилагательному «термоядерный», который в словарях определяется как профессионализм, то есть слово, функционирующее прежде всего в профессиональной лексике. «Термояд» — так можно сказать и о термоядерном синтезе, и о термоядерной реакции, и о термоядерных исследованиях в целом. Так, в одном слове прячутся сразу несколько возможных словосочетаний, а о чем именно идет речь, собеседники могут понять из контекста.

**ТЕРМОЯД** [те] и [тэ], -а; м. Проф. Термоядерная реакция, термоядерный синтез. Управляемый т. Реализация лазерного термояда<sup>12</sup>.

**Общая задача всех термоядерных установок — и токамаков, и стеллараторов, и осесимметричных тороидов — поиск решений по удержанию и стабилизации плазмы. А лингвисты изучают термины и понятия, возникающие в результате открытий и создания новых технологий.**

7. <https://nplus1.ru/news/2018/05/21/again-Wendelstein>

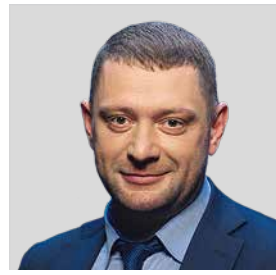
8. Большая российская энциклопедия: <https://old.bigenc.ru/physics/text/4165147>

9. <https://www.atomic-energy.ru/SMI/2022/05/30/125202>

10. <https://gufo.me/dict/kuznetsov/%D1%8F%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9>

11. <https://gufo.me/dict/kuznetsov/%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D1%8F%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%B9>

12. <https://gufo.me/dict/kuznetsov/%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D1%8F%D0%B4>



Текст: Федор Буйновский

# Конкуренция как стратегия не прямых действий

Учебник стратегического мышления: как выигрывать, не сражаясь

**Книга Генри Бэзила Лиддел Гарта «Стратегия не прямых действий» была опубликована в 1941 году. Со временем данный термин преобразовался в универсальный принцип, применимый практически ко всем видам деятельности.**

## Провидец или шпион?

Знаменитый британский мыслитель Генри Бэзил Лиддел Гарт (1895–1970), пожалуй, остается наиболее влиятельной фигурой среди многочисленных европейских военных теоретиков XX века. В настоящее время значимость его работ мало кем оспаривается, а по масштабу трудов его сопоставляют с Карлом фон Клаузевицем, Гансом Дельбрюком и Сунь-цзы.

Теория Лиддел Гарта, получившая название «стратегия не прямых действий», первоначально явилась результатом его размышлений по поводу гигантских потерь армий в Первой мировой войне. О военных действиях британский теоретик знал не понаслышке, приняв участие в знаменитой битве на Сомме в 1916 году. Впоследствии теория Лиддел Гарта дополнялась выводами уже из опыта Второй мировой войны и локальных вооруженных конфликтов 30–40-х годов XX века.

Любопытно, что «капитана Лиддел Гарта», как он обычно подписывал свои статьи до посвящения в рыцарство в 1966 году, подозревали если не в шпионаже в пользу нацистской Германии, то в симпатиях к нацистам и в причастности к разработке плана блицкрига по той причине, что многие положения этого плана были словно списаны из статей и исследований Лиддел Гарта. Уинстон Черчилль даже потребовал ареста военного обозревателя газеты «Таймс», однако секретная служба МИ-5 ограничилась тем, что установила наблюдение за Лиддел Гартом, прослушивала его телефонные звонки и перлюстрировала переписку. Когда в 2006 году были за прошествием времени открыты военные архивы МИ-5, выяснилось, что Лиддел Гарт за три месяца до высадки союзников

в Нормандии обсуждал (в кругу лиц, принимавших решения) и критиковал планы генштаба на «День Д».

## Закон жизни

Лиддел Гарт попытался преобразовать открытый им стратегический принцип в философский концепт, распространив свои выводы на максимально возможное число областей человеческой деятельности. Хорошей иллюстрацией данного стремления является отрывок из предисловия к «Стратегии не прямых действий»: «Когда я изучал очень многие военные кампании и впервые осознал превосходство не прямых действий над прямыми, мне просто хотелось более полно раскрыть сущность стратегии. Однако при более глубоком изучении я начал понимать, что метод не прямых действий имел значительно большее применение, что он является законом жизни во всех областях, философской истиной. Оказалось, что его применение служит ключом к практическому решению любой проблемы, решающим фактором в которой является человек, когда противоречивые интересы могут привести к конфликту. Изменение взглядов достигается более легко и быстро незаметным проникновением новой идеи или же посредством спора, в котором инстинктивное сопротивление оппонента преодолевается обходным путем».

При этом зачастую сам термин «не прямые действия» толкуют весьма широко и нередко подводят под это определение стратегию как таковую, словно бы напрочь исключая из рассмотрения лобовой удар (в самом общем смысле) в качестве одного из методов воплощения стратегии на практике. Подобный подход вряд ли можно назвать правильным, поскольку не прямые действия — все-таки часть стратегии, а не стратегия в целом, и при всей важности не прямых действий в любом отношении нельзя сводить к ним стратегию и тактику целиком.

Кстати, показательный пример: если обратиться к современному военному опыту (а теория не прямых действий непосредственно связана в первую очередь с ним), налицо четкое разграничение сфер «прямой»

стратегии, оперирующей традиционными штабными понятиями, восходящими еще к временам античности, и стратегии «не прямой», более известной сегодня как методы информационной войны. То же самое можно наблюдать и в бизнесе, где сосуществуют (не подменяют, а дополняют друг друга) практическая, производственная деятельность и «косвенная», информационная активность, стимулирующая первую и призванная подорвать позиции конкурентов. И успех, не кратковременный, промежуточный, а, если угодно, глобальный, как в военных операциях, так и в деловых и политических, возможен лишь при сочетании тех и других действий.

## Стратегическая иерархия

Лиддел Гарт стремился представить теорию стратегии через иерархию стратегических ступеней. Наивысший уровень стратегического планирования совпадает у него с «военной политикой», или, иначе, «государственными интересами». Второй уровень, относящийся, собственно, к мобилизации людских и экономических ресурсов для успешного ведения войны, британский теоретик называет «большой стратегией». На третьем уровне, в свою очередь, располагается «военная стратегия». Данный уровень выдвигает на первый план фигуру полководца, воспринимающего стратегию в качестве искусства достижения победы посредством использования вооруженных сил. Лиддел Гарт пытается показать, что восприятие понятия «стратегия» через метафору «искусство полководца» продуктивнее, нежели интерпретация данного понятия через метафору «военная наука».

Четвертый, и низший, уровень составляет «тактическое руководство». Соизмеряя соотношение иррациональных и рациональных факторов применительно к тактике и стратегии, теоретик полагает, что стратегия в большей степени рациональна, нежели тактика. По мнению британского исследователя, цели, формируемые низшим уровнем, должны подчиняться целям, декларируемым высшим уровнем. Поскольку противоречия в определении целей особенно заметны, когда дело касается «государственной политики» и «военной стратегии», политик иногда вынужден идти на различные ухищрения и манипуляции, стремясь к реализации высших «государственных» интересов. Определение целей, в свою очередь, зависит от понимания смысла победы: «Победа в ее истинном значении подразумевает, что послевоенное устройство мира и материальное положение народа должны быть лучше, чем до войны», — пишет Гарт.

## Движение и внезапность

Наиболее разработанным уровнем военно-теоретической системы Лиддел Гарта является «военная стратегия». Как раз применительно к данной области возникает концепт «не прямые действия», значение которого позже распространяется по стратегической иерархической лестнице как вверх, к «государственной политике» и «большой стратегии», так

**Генри Бэзил Лиддел Гарт** был офицером, военным корреспондентом, историком, консультантом британского правительства. Его теоретические работы основаны на анализе опыта ведения военных действий от античных битв до глобальных и локальных конфликтов XX века. Джон Ф. Кеннеди называл его «капитаном, который учит генералов», а некоторые положения, изложенные в трудах Лиддел Гарта, оказывают влияние на военную мысль до сих пор. В течение 20 лет работы над монументальной монографией по истории Второй мировой войны он имел доступ к огромному количеству документов, трофейным немецким и японским архивам, дневникам участников событий, проводил интервью с бывшими немецкими военными и политическими деятелями. Отмечается его умение беспристрастно анализировать исторические события и формировать собственное независимое мнение.

и вниз, к «тактике». Автор говорит о двух элементах «военной стратегии», один из которых по отношению к сознанию воюющего носит скорее внешний, физический, а другой — внутренний, ментальный характер. Первый он называет движением, а второй внезапностью. Стратег должен помнить, что физика и психология войны неотделимы друг от друга, что отражено во взаимовлиянии элементов.

К «позитивным принципам» британский теоретик относит следующие:

- 1) выбор цели согласно средствам;
- 2) умение не отклоняться от цели даже в условиях меняющейся обстановки;
- 3) действия по направлению, откуда меньше всего ждут удара;
- 4) действия по линии наименьшего сопротивления;
- 5) создание одновременной угрозы нескольким объектам;
- 6) гибкость плана: «В плане вы должны предусмотреть и разработать дальнейшие мероприятия на случай успеха, неудачи или частичного успеха, что чаще всего бывает во время войны».

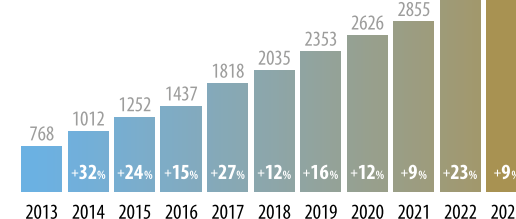
Фактически все эти правила в дальнейшем перешли в области рыночных стратегий и стали прямым руководством к действиям для захвата рынков в бизнесе. И если понимать, на что исторически и идеологически опираются конкуренты, то это освобождает от заблуждений в конкурентной борьбе с соперниками.



# ЧЕЛОВЕК ГОДА РОСАТОМ 2023

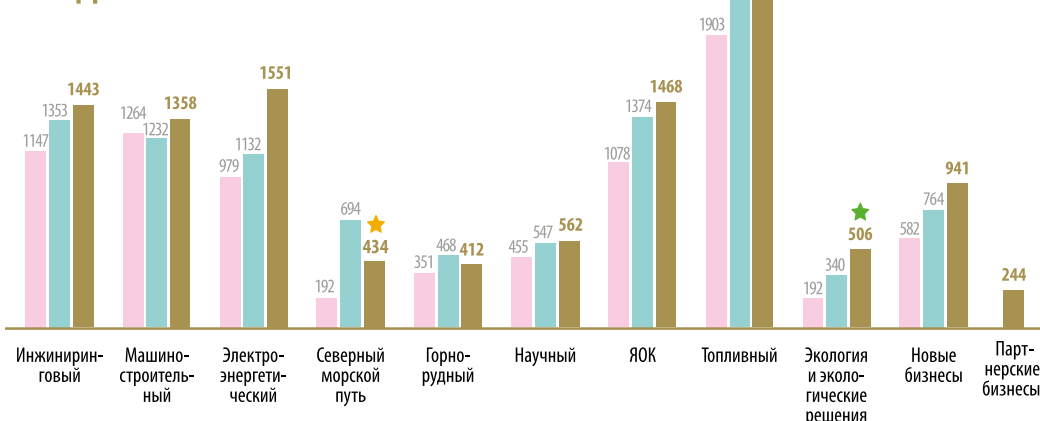
# НОВЫЙ РЕКОРД! Итоги заявочной кампании

## 23530 ЗАЯВОК ЗА 11 ЛЕТ

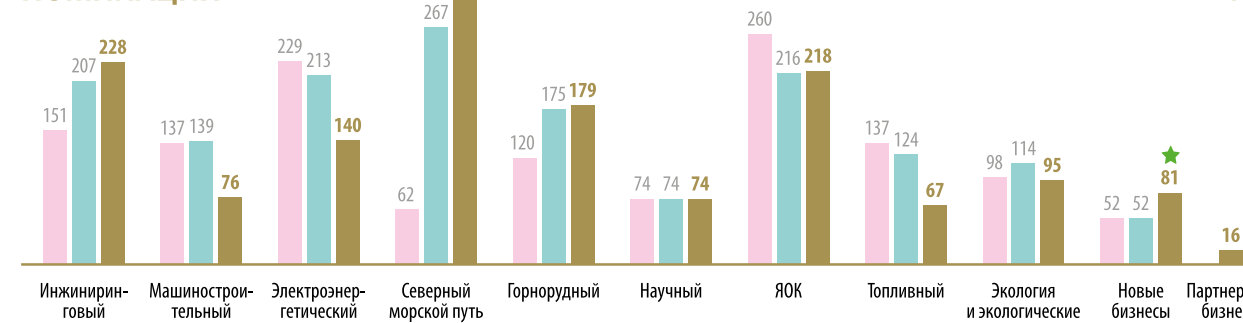


По итогам 2023 года подано:  
**1475** на дивизиональные номинации  
**169** на общедивизиональные номинации  
**795** на общекорпоративные номинации  
**1384** на спецноминации гендиректора  
**31** на спецприз председателя набсовета

## ОХВАТ РАБОТНИКОВ ПО ДИВИЗИОНАМ



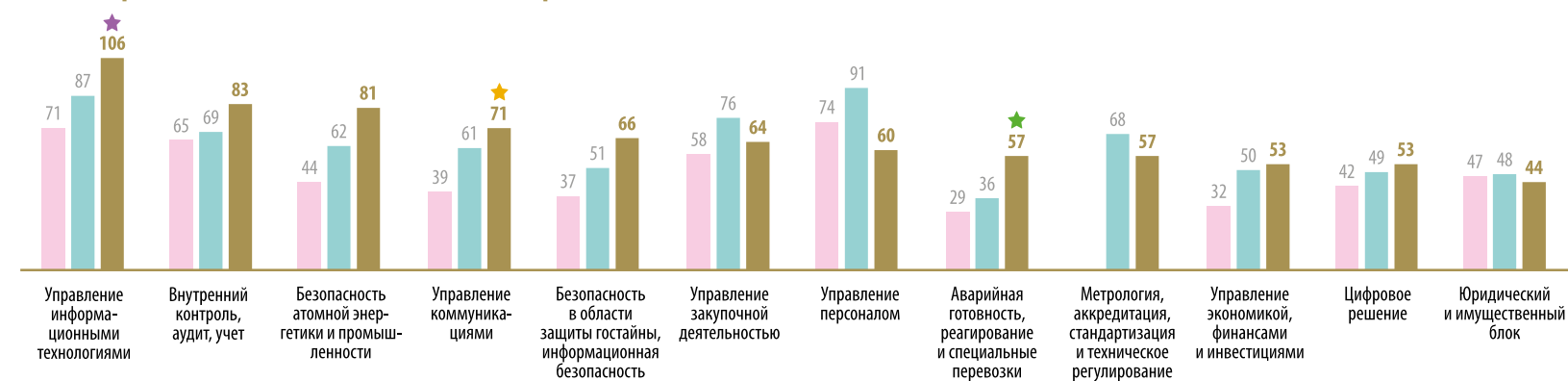
## 48 ДИВИЗИОНАЛЬНЫХ НОМИНАЦИЙ



## 3 ОБЩЕДИВИЗИОНАЛЬНЫЕ НОМИНАЦИИ



## 12 ОБЩЕКОРПОРАТИВНЫХ НОМИНАЦИЙ



## 10 СПЕЦИАЛЬНЫХ НОМИНАЦИЙ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА И СПЕЦПРИЗ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ НАБСОВЕТА

