

# ВЕСТНИК АТОМПРОМА

№ 5 | июнь | 2025

*Главная тема*

## **Атомные тренды**

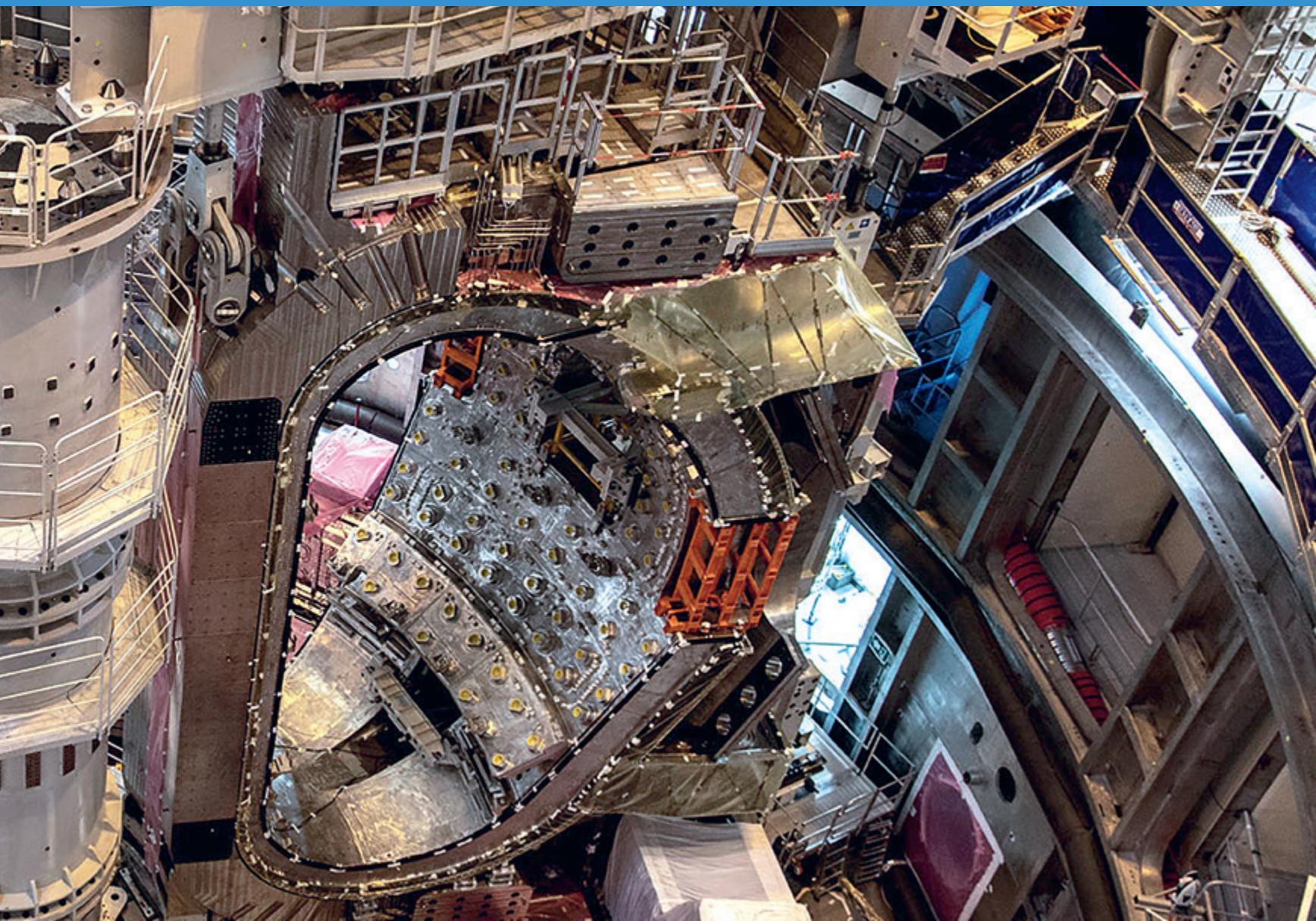
*Перспективные направления  
развития мировой и российской  
атомной отрасли*

*В номере*

Технологии извлечения урана 42

Импортозамещение в ТЭК 44

Метрология 46



## Уважаемые читатели!

«Вестник атомпрома» регулярно знакомит вас с актуальными направлениями деятельности как российской, так и мировой атомной отрасли. Однако не всегда в материалах, посвященных конкретным, иногда достаточно узким темам, у нас есть возможность дополнительно дать более развернутую картину, в том числе общемировую, по определенной проблематике.

Главная тема этого номера дает возможность глубже вникнуть в ключевые направления развития и перспективы глобальной атомной отрасли и получить представление о задачах, стоящих перед «Росатомом» при работе внутри страны и на мировом рынке. Надеемся, что материалы главной темы станут для вас своеобразной мини-энциклопедией и полезным путеводителем сразу по нескольким темам, определяющим будущее ядерных технологий в России и в мире.

Также мы рассказываем о том, какие задачи решает Горнорудный дивизион «Росатома» для максимизации извлечения запасов урана, какие новации появляются в работе отраслевых метрологических служб и кто в этом году стал лучшим начальником цеха АЭС.

**ВЕСТНИК  
АТОМПРОМА**

№ 5, июнь 2025 года

Информационно-аналитическое издание

16+

Фото на обложке ИТЭР

**Главный редактор**  
Долгова Ю. В.  
dolgova@strana-rosatom.ru

**Выпускающий редактор**  
Еременко О. В.

**Дизайн и верстка**  
Балдин В. В.

**Корректор**  
Бомбенкова А. Н.

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

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

**Отдел распространения и рекламы**  
Сазонова Т. С.  
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.  
Дата выхода в свет: 30.06.2025

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-007/25.

## Содержание

Главная тема	КОРОТКО	<b>Хочу все знать</b> <span style="float: right;">4</span>	Технологии	<b>Добыча по максимуму</b> <span style="float: right;">42</span>
		<i>Атом сегодня и завтра</i>		<i>Предложения для максимального извлечения запасов урана</i>
	ПРЯМАЯ РЕЧЬ	<b>Сила — в знании</b> <span style="float: right;">6</span>	Импортозамещение	<b>Проверочная работа</b> <span style="float: right;">44</span>
		<i>Независимая отраслевая аналитика как инструмент принятия управленческих решений</i>		<i>В Лесном готовы испытывать оборудование для нефтяников</i>
	БЕЗОПАСНОСТЬ	<b>Барьеры и меры</b> <span style="float: right;">8</span>	Метрология	<b>Нестандартные стандарты</b> <span style="float: right;">46</span>
		<i>Как обеспечивается безопасность АЭС: вчера, сегодня, завтра</i>		<i>Какие задачи решают метрологи-атомщики</i>
	РАДИОХИМИЯ	<b>Иногда оно возвращается</b> <span style="float: right;">14</span>	Производство	<b>Чей цех лучше всех?</b> <span style="float: right;">49</span>
		<i>Что делают в разных странах с отработавшим ядерным топливом</i>		<i>Рассказываем, почему начальник цеха — это ключевая фигура на АЭС и в чем секрет успеха лучших начальников цехов</i>
	ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ИНФРАСТРУКТУРА	<b>От мала до велика</b> <span style="float: right;">21</span>	ИЦАЭ	<b>Звезды из университетов</b> <span style="float: right;">54</span>
		<i>Исследовательские реакторы — настоящее и будущее</i>		<i>Как и зачем в региональных научных центрах нужно выращивать популяризаторов науки</i>
	МАТЕРИАЛЫ	<b>Баланс прочности и безопасности</b> <span style="float: right;">30</span>	Особое мнение	<b>Темная сторона власти</b> <span style="float: right;">57</span>
		<i>От углеродистой стали до вольфрама: материалы атомной эпохи</i>		<i>«Неореакция»: новые технологические элиты предлагают новое видение будущего</i>
	ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ	<b>На пути к безграничной энергии</b> <span style="float: right;">34</span>		
		<i>Какие установки для термоядерного синтеза эксплуатируют, разрабатывают и строят в мире</i>		

# Атом сегодня и завтра: хочу все знать

Мировая атомная отрасль — это самый сложный научно-промышленный комплекс, развитие которого опирается на сплав фундаментальных знаний и передовых технологий. Комплекс этот столь многогранен — от добычи урана до вывода ядерных объектов из эксплуатации, — что системно отслеживать изменение тенденций в самых разных областях, связанных с ядерными технологиями, не всегда легко даже специалистам.

Важно отметить, что в эпоху стремительного развития генеративного искусственного интеллекта ценность актуальной, четко структурированной и, что особенно существенно, достоверной и верифицированной информации, основанной на надежных источниках, многократно возрастает. Поэтому возможность познакомиться с развернутым анализом стратегических направлений развития мировой атомной индустрии и ее научно-исследовательской инфраструктуры, выполненным на основе работ независимых отраслевых экспертов, представляется особенно интересной и полезной.

Главная тема номера дает нашим читателям именно такую возможность знакомства с систематизированной и углубленной, но достаточно доступно изложенной информацией по нескольким ключевым для атомной отрасли темам: обеспечение безопасности атомных электростанций разных поколений, решения в области переработки ОЯТ, перспективы развития зарубежных и российских исследовательских реакторов, конструкционные материалы для активных зон инновационных реакторов, программы в сфере управляемого термоядерного синтеза.

Все эти направления проанализированы с учетом глобальных трендов и современного состояния конкретных зарубежных проектов. Это особенно важно с точки зрения понимания сильных сторон и потенциала «Росатома» в свете необходимости укрепления технологического лидерства госкорпорации, усиления ее позиций на мировой арене и расширения международного сотрудничества.

Фото: НВАЭС / Роман Пышкин

# Сила — в знании

Независимая отраслевая аналитика как инструмент принятия управленческих решений



**Отраслевой Центр аналитических исследований и разработок (ЦАИР) был создан в 2019 году в контуре научного блока «Росатома», в структуре частного учреждения «Наука и инновации». Целью ЦАИР является информационно-аналитическое обеспечение руководства и экспертного сообщества госкорпорации «Росатом» и ее дочерних организаций. Директор ЦАИР Антон Пономарев рассказал «Вестнику атомпрома» о направлениях и форматах работы центра.**

— Какова сфера деятельности ЦАИР?

— В число ключевых направлений деятельности центра входят:

- аналитические исследования по стратегическим направлениям развития и ключевым технологиям госкорпорации «Росатом»;
- мониторинг и анализ мировых технологических трендов;
- развитие инструментов аналитической деятельности;
- организация научно-технических мероприятий по актуальным для отрасли тематикам;

• участие в международных проектах, инициативах, рабочих группах, мероприятиях под эгидой МАГАТЭ и других международных организаций.

Одним из основных форматов работы ЦАИР с момента его основания стала подготовка тематических аналитических отчетов. Первые пять отчетов по актуальным темам отраслевой значимости были подготовлены в декабре 2019 года, спустя три месяца после создания ЦАИР. В 2020 году они были отрецензированы отраслевыми экспертами, представлены на слушаниях с участием вовлеченных в ту или иную тематику организаций отрасли, доработаны, депонированы и изданы в полиграфии. Впоследствии этот алгоритм был использован при подготовке всех новых отчетов. К настоящему времени подготовлено 53 тематических отчета по различным темам, связанным с атомной энергетикой, ядерным топливным циклом, исследовательскими реакторами, технико-экономическим моделированием, странами и регионами присутствия госкорпорации «Росатом» и смежными тематиками.

— По каким критериям выбираются темы для аналитических отчетов?

— Темы отчетов выбираются в соответствии с ключевыми направлениями деятельности и стратегическими приоритетами госкорпорации «Росатом». На первых этапах работы значительную часть тем мы выбирали самостоятельно, на основе анализа глобальных трендов, и, как показала практика, отчеты по этим темам оказались крайне востребованными. В дальнейшем мы начали получать больше запросов на аналитику по конкретным темам от руководства, разных подразделений госкорпорации «Росатом» и организаций отрасли. К примеру, при составлении плана деятельности на 2025 год мы получили от организаций запросы, содержащие более 30 тем для аналитических исследований, однако в силу ресурсных ограничений мы взяли в работу лишь часть из них.

В каждом отчете содержатся выводы и практические рекомендации, которые

могут служить основой для принятия управленческих решений по тому или иному направлению. Результаты изданных отчетов используются руководителями и специалистами в профессиональной деятельности, цитируются на отраслевых мероприятиях и в публикациях.

— Расскажите, пожалуйста, подробнее о тематике отчетов предыдущих лет.

— За более чем пять лет работы ЦАИР подготовил аналитические отчеты, охватывающие большую часть ключевых направлений деятельности госкорпорации «Росатом».

В области атомной энергетики подготовлена серия отчетов по АЭС малой, средней и большой мощности (включая оценку конкурентоспособности проектов), реакторным системам четвертого поколения, управляемому термоядерному синтезу, перспективным конструкционным материалам, выводу ядерных объектов из эксплуатации, анализу крупнейших аварий, атомному опреснению и тепло-снабжению, международным проектам сотрудничества и т.д.

В области ядерного топливного цикла проанализированы ресурсная база атомной энергетики (уран, плутоний, торий), разработки в сфере толерантного топлива, а также подготовлена серия отчетов по технологиям завершающей стадии ЯТЦ (включая обращение с ОЯТ, радиохимические технологии, утилизацию минорных актинидов, уранплутониевое топливо и т.д.).

Являясь частью научного блока, ЦАИР уделяет особое внимание анализу развития научно-исследовательской инфраструктуры. Выпущены отчеты, посвященные текущему состоянию и перспективам развития парка исследовательских реакторов в России и за рубежом, формам международной кооперации в данной области, центрам ядерной науки и технологий и т.д.

Подготовлен ряд отчетов по странам и регионам присутствия «Росатома»: по Китаю,

Индии, Корейскому полуострову, Ближнему Востоку, Латинской Америке, Африке.

Проделана большая работа в области каталогизации и кросс-верификации программных средств технико-экономического моделирования ядерных энергетических систем. Подготовлено несколько отчетов, посвященных многокритериальному анализу (в том числе для сравнительной оценки реакторных технологий).

Кроме того, проведены аналитические исследования по широкому спектру смежных тематик, начиная с радиоизотопных источников питания и водородной энергетики и заканчивая искусственным интеллектом и вопросами управления НИОКР и инновациями.

— Каковы темы исследований ЦАИР, запланированных на ближайшее время? Почему выбраны именно эти темы?

— В 2025 году мы продолжаем готовить аналитические отчеты по темам, важным с точки зрения укрепления технологического лидерства госкорпорации «Росатом», усиления ее позиций на мировой арене и расширения международного сотрудничества.

В частности, мы продолжаем работу по анализу конкурентоспособности проектов АЭС большой мощности «Росатома» в сравнении с зарубежными проектами. Это исследование направлено на выявление сильных сторон и потенциальных точек роста, что необходимо для укрепления позиций «Росатома» на международном рынке. Кроме того, мы исследуем возможности производственной и экспериментальной базы «Росатома» для обеспечения развития атомной энергетики

(в том числе применительно к АСММ), а также проводим сравнительный анализ программ господдержки экспериментальной базы в различных странах.

В рамках анализа перспективных направлений научно-технологического развития «Росатома» мы также готовим отчеты по новым вычислительным и квантовым технологиям, а также использованию ускорительной техники для радиационного материаловедения и промышленности.

В области международного сотрудничества анализируем взаимодействие госкорпорации «Росатом» с МАГАТЭ, а также возможности для развития многостороннего сотрудничества в сфере атомной энергетики в рамках БРИКС.

Кроме того, мы исследуем международный опыт разработки ядерных энерго-технологий для космических применений, что актуально в контексте глобальной конкуренции в космической отрасли и перспектив российских проектов.

— Где можно ознакомиться с полными текстами отчетов, в том числе прошлых лет?

— В полиграфии отчеты выпускаются ограниченным тиражом, порядка 150–200 экземпляров, и направляются руководству отрасли и в организации госкорпорации «Росатом». В электронном виде полнотекстовые тематические отчеты, а также другие результаты работы ЦАИР (обзорные отчеты по перспективным направлениям научно-технологического развития, дайджесты, презентации, материалы научно-технических мероприятий, обучающие курсы для аналитиков и т.д.) доступны сотрудникам организаций госкорпорации на отраслевом портале «Страна Росатом».



**Виктор Ильгисонис**

Директор направления научно-технических исследований и разработок госкорпорации «Росатом»:

— Я абсолютно убежден в том, что нашей отрасли нужна собственная независимая аналитика. Именно независимая, то есть выполняемая не по заказу и за деньги отдельных предприятий или дивизионов, а с целью беспристрастной оценки состояния дел. Такие оценки необходимы в наших реалиях, поскольку мы вынуждены постоянно прогнозировать значимость и востребованность результатов планируемых работ и принимать решения по их запуску, продолжению или остановке. Крайне важно, чтобы эти решения принимались не по наитию и на основе какой-либо отрывочной информации и личных впечатлений руководителей, а с опорой на экспертный анализ.

Выполненный в последние годы Центром аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации» целый ряд комплексных отчетов по ключевым для нашей отрасли направлениям является хорошим примером такого анализа; я настоятельно рекомендую всем с ним ознакомиться. Несмотря на более чем скромный состав коллектива и ограниченность ресурсов, подготовленные материалы демонстрируют достаточную глубину проработки, основанной на использовании современных инструментов и стандартов аналитической работы, актуальность и взвешенность выводов.

Хочу надеяться, что ЦАИР и его деятельность будут успешно развиваться и получат необходимую для этого поддержку.



**Илья Журавлев**

Руководитель группы приоритетных направлений научно-технологического развития ЦАИР:

— Сегодня Россия является мировым лидером по строительству атомных электростанций за рубежом. Несмотря на то, что АЭС с ВВЭР опытом эксплуатации доказали свою безопасность, проекты ВВЭР на мировом рынке находятся в условиях острой конкуренции со стороны как традиционных (США, Франция), так и новых (Республика Корея, Китай) участников рынка АЭС большой мощности, стремящихся обосновать передовые показатели безопасности своих проектов. Одновременно в России ведется интенсивная работа по созданию реакторов поколения IV, обладающих характеристиками внутренне присущей безопасности. Первой коммерческой энергетической установкой поколения IV большой мощности должен стать энергоблок №5 Белоярской АЭС с реактором БН-1200М.

Обеспечению безопасности АЭС с ВВЭР всегда придавалось первостепенное значение. Совершенствование подходов к обеспечению безопасности и соответствующих инженерных решений в ходе 60 лет эволюции технологии ВВЭР позволило создать первые в мире энергоблоки ВВЭР поколения III+, эксплуатируемые на Нововоронежской АЭС-2 и на Ленинградской АЭС. Сохранение конкурентоспособности технологии ВВЭР на мировом рынке требует разработки проектов, превосходящих конкурентные предложения не только по стоимости и срокам сооружения энергоблоков, но также с точки зрения обеспечения их безопасности.

Летом 2023 года по поручению первого заместителя генерального директора госкорпорации «Росатом» Александра Локшина была подготовлена справка о сравнении конкурентоспособности блоков ВВЭР с корейскими и китайскими блоками, затем отчет, содержащий рассмотрение более широкого круга вопросов, нежели только подход к обеспечению безопасности. Осенью 2023 года заместителем генерального директора МАГАТЭ Михаилом Чудаковым был поднят вопрос отнесения зарубежных проектов к поколениям III и III+. По итогам обсуждения была подготовлена справка, которая легла в основу настоящего отчета.

Уникальность отчета заключается в том, что в одном документе содержится анализ современных тенденций развития технических средств и нормативных требований, а также принципиальных подходов к обеспечению безопасности АЭС большой мощности в разрезе развития поколений проектов АЭС.

ЦАИР в 2024 году подготовил отчет, систематизирующий информацию о подходах к обеспечению безопасности отечественных и зарубежных проектов АЭС большой мощности и содержащий классификацию поколений АЭС<sup>1</sup>, отталкиваясь от данных подходов. В отчете подробно рассмотрены построение активных и пассивных систем безопасности отечественных и зарубежных проектов АЭС большой мощности поколений III и III+ и их функционирование в условиях проектных и запроектных аварий. Отчет также содержит описание преимуществ и недостатков концепций удержания расплава в корпусе при тяжелой аварии и применения ловушек расплава. Рассмотрен переход к концепции внутренне присущей безопасности в проектах поколения IV.

# Барьеры и меры

## Как обеспечивается безопасность АЭС: вчера, сегодня, завтра

Безопасность людей и окружающей среды является наивысшим приоритетом для госкорпорации «Росатом». Первая в мире атомная электростанция — Обнинская АЭС — заработала более 70 лет назад. Атомная энергетика с тех пор прошла огромный путь: сейчас «Росатом» эксплуатирует и строит энергоблоки с реакторными установками ВВЭР поколения III+, в которых реализованы самые современные подходы к обеспечению безопасности. Одновременно наши зарубежные партнеры заявляют о причислении своих проектов к поколению III+, но оправданно ли это? И какие характеристики проекта могут служить признаками принадлежности к поколению III+? Заглядывая за горизонт достигнутого, атомщики ведут активную работу по созданию ядерных энергетических систем следующего поколения, в которых подход к вопросам безопасности выводится на новый уровень.

### Вероятность — одна миллионная

Принципы обеспечения безопасности АЭС для защиты людей и окружающей среды от радиологической опасности сформулированы в документах

<sup>1</sup> Журавлев И. Б., Пономарев А. В. Сравнение подходов к обеспечению безопасности проектов АЭС поколений III и III+ / Госкорпорация «Росатом», ЧУ «Наука и инновации», ЦАИР. — М., 2024.

**Текст:** Алексей Комольцев  
**Фото:** концерн «Росэнергоатом», МАГАТЭ, «Аккую Нуклеар», СХК, Википедия  
**Инфографика:** источник — ЦАИР

МАГАТЭ. В основе безопасности АЭС лежит принцип глубокоэшелонированной защиты. Его реализация заключается в применении системы барьеров на пути распространения излучения и радиоактивных веществ, а также технических и организационных мер для сохранности этих барьеров. Если барьеры нарушены — принимаются меры по защите персонала и окружающей среды. Физических барьеров четыре: сама топливная матрица (прочная таблетка топлива), оболочка твэла, граница контура теплоносителя реактора, герметичное ограждение.

Принцип глубокоэшелонированной защиты распространяется и на деятельность человека. Система технических и организационных мер образует пять уровней. Первый — качественно выполненный проект АЭС, контроль качества производства и монтажа, квалификация всех причастных к созданию и эксплуатации. Второй — обеспечение готовности оборудования и систем станции, важных для ее безопасности. Третий — инженерные системы безопасности, которые не дают перерасти отклонениям в проектные и запроектные аварии. Четвертый — отработка мероприятий по управлению ходом развития запроектных аварий. Наконец, если все-таки неблагоприятный сценарий реализовался, то пятый уровень защиты — противоаварийные меры вне площадки АЭС.

И еще немного базовой информации. Основные характеристики безопасности АЭС, принятые в мире, — это частота повреждения активной зоны и вероятность большого выброса радиоактивности. Целевым показателем для действующих АЭС является вероятность серьезного повреждения активной зоны ниже 1/10 000 на год эксплуатации блока. Вероятность большого выброса должна быть еще в 10 раз ниже. Задачей при эксплуатации будущих АЭС видится практическое исключение аварий с большим ранним (таким, что нет времени принять меры по защите населения) выбросом радиоактивности. В качестве цели по безопасности в большинстве стран в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ для новых блоков АЭС устанавливается вероятность большого выброса 1/1 000 000 на блок в год. Финский регулятор STUK устанавливает допустимую вероятность большого выброса в размере

1/2 000 000 на реактор в год. И наконец, в России целевой ориентир для показателя вероятности большого выброса составляет 1/10 000 000 на реактор в год.

### Зарезервировано. Многократно

Общим принципом построения систем безопасности является обеспечение их высокой надежности. Она достигается за счет использования отказоустойчивых решений (чтобы система управления не «падала» в результате нештатного события или их сочетаний в основном оборудовании). Кроме того, обеспечивается независимость систем безопасности от технологических систем станции. Выполнение системой заданных функций при любом исходном событии, требующем ее работы, и независимом единичном отказе обеспечивается через резервирование — использование двух или более идентичных по структуре независимых каналов — так, чтобы отказ одного канала не приводил к отказу других, а способность выполнить функцию для всей системы сохранялась бы. Например, у системы аварийного охлаждения ВВЭР-1000 (В-320) три канала — и любого достаточно для преодоления проектных аварий.

Снижение вероятности отказов резервированных систем и их каналов по общей причине достигается за счет физического разделения систем (расстояние, прочные и противопожарные барьеры и т.д.) и применения разнотипных (то есть выполняющих одни функции, но разных по принципу действия) систем и оборудования. Например, насос питательной воды парогенератора может иметь электрический и турбинный привод. Арматура может иметь ручной, электрический и пневматический привод: при больших неприятностях, вроде полного обесточивания блока, можно перекрыть задвижку традиционно, грубой физической силой. Поэтому заметим без всякой иронии, что сдача норм ГТО для сотрудников атомной отрасли и в целом спортивный образ жизни — не просто активность.

### Из поколения в поколение

Энергетические реакторы первого поколения разрабатывались в 50–60-х годах прошлого века. В нашей

## Заявленные для проектов АЭС БМ величины повреждения активной зоны и частот большого выброса

Проект	ВВЭР-1200		«Хуалун-1» (HPR1000)	EPR-1600	APR1400	AP1000, CAP1400
	В-491 (ЛАЭС-2)	В-392М (НВАЭС-2)				
Частота повреждения активной зоны (реактор-год) <sup>1</sup>	5,9 × 10 <sup>-7</sup>	6,1 × 10 <sup>-7</sup>	<10 <sup>-6</sup>	6,1 × 10 <sup>-7</sup>	1,3 × 10 <sup>-6</sup> (внутренние события на мощности)	2,4 × 10 <sup>-7</sup> (AP1000, внутренние события на мощности); 4,02 × 10 <sup>-7</sup> (CAP1400)
Частота большого выброса (реактор-год) <sup>1</sup>	<10 <sup>-7</sup>	<10 <sup>-7</sup>	<10 <sup>-7</sup>	<10 <sup>-7</sup>	6,1 × 10 <sup>-7</sup>	<6 × 10 <sup>-8</sup> (AP1000) 5,07 × 10 <sup>-8</sup> (CAP1400)

стране к реакторам этого поколения относят установки проектов ВВЭР-210, ВВЭР-365 (блоки № 1 и 2 Нововоронежской АЭС) и ВВЭР-440 проектов В-179 и В-230 (блоки № 3 и 4 Нововоронежской и блоки № 1 и 2 Кольской АЭС), реакторы АМБ Белоярской, все четыре ЭГП-6 Билибинской АЭС и первые РБМК-1000 (блоки № 1 и 2 Ленинградской, № 1 и 2 Курской АЭС).

В обоснование безопасности реакторов поколения I закладывалось условие невозможности крупного нарушения герметичности первого контура, которое могло бы привести к существенному ухудшению охлаждения активной зоны. Требования к системам локализации аварии ограничивались, а обеспечение безопасности опиралось на предотвращение исходных событий — качество конструирования, изготовления и монтажа оборудования и повышенные требования к эксплуатации. Известно, что этот подход не выдержал испытаний временем, и большие аварии (Три-Майл-Айленд и Чернобыль) показали, чем реальность отличается от идеальных задумок. Каждая из аварий создавала огромную мотивацию для развития систем безопасности, но развитие шло и эволюционным путем.

Условно можно обозначить поколение II как установки, построенные до конца 1990-х годов. В нашей стране это более совершенные ВВЭР-440 (проект В-213), ВВЭР-1000 (проект В-320) и РБМК второй очереди. Три разрушенных реактора на АЭС «Фукусима-1» (BWR-3, 4) относились именно к поколению II. В установках поколения II предусмотрены технические меры, обеспечивающие безопасность при

«максимальной проектной аварии» (МПА) — мгновенном разрыве главного циркуляционного трубопровода. Оборудование, трубопроводы и системы первого контура стали размещать внутри защитной герметичной оболочки (контейнента), рассчитанной и на внутренние, и на внешние нагрузки (ветровые, сейсмические и т.д.). Проектный срок службы проектов АЭС поколения II — 30–40 лет, мощность энергоблока — до 1 ГВт (э), частота перегрузки топлива — раз в год. Что касается безопасности, частота повреждения активной зоны рассчитывалась как 1/10 000 для реактора в год; большого выброса — 1/100 000. Но системы безопасности были спроектированы лишь для преодоления заданного набора проектных аварий. Появились первые пассивные системы безопасности — чаще всего гидроемкости САОЗ. Для преодоления тяжелых аварий специальных систем не предусматривалось.

Ядерные реакторы третьего поколения появились в результате эволюции поколения II. Характерными чертами этих реакторов стали более высокая топливная эффективность, улучшенный тепловой КПД, стандартизация конструкции для снижения капитальных затрат и затрат на техническое обслуживание. Были достигнуты более высокие экономические характеристики: мощность до 1700 МВт (э); КИУМ до 95%; возможность маневрирования мощностью; проектный срок службы — 60 лет. Выгорание топлива увеличено до 60–70 МВт сут./тU, топливная кампания могла достигать 18 месяцев.

Важной особенностью реакторов поколения III является значительное усовершенствование систем

безопасности, разработанных с учетом опыта тяжелых аварий. Частота повреждения активной зоны определялась как меньше 1/100 000; частота большого выброса — менее 1/1 000 000 для реактора в год. Блоки третьего поколения повысили устойчивость к единичному отказу или ошибке оператора (резервирование стали применять шире). Возросла устойчивость к сейсмическим воздействиям. Появились системы безопасности для преодоления тяжелых аварий.

Также в третьем поколении получили развитие, хотя и ограниченное, пассивные системы безопасности. Это системы, функционирование которых связано только с вызвавшим ее работу событием и не зависит от других, например сигнала АСУ, электроприводов (то есть электроснабжения в целом). Пассивные системы безопасности приводятся в действие естественными силами или явлениями, такими как гравитация, перепад давления, тепловая конвекция, инерция. Но их применение, например, для аварийного охлаждения реактора в поколении III (до III+) было ограниченным. Безопасность в значительной степени зависела от внешних приводных устройств (электроприводов, получающих питание от дизель-генераторов).

Именно широкое применение пассивных систем безопасности отличает проекты поколения III+, эти системы рассчитаны на обеспечение критических функций безопасности (КФБ) до 72 часов. Кроме того, проекты поколения III+ содержат конструктивные особенности, позволяющие смягчить последствия аварии с расплавлением активной зоны — либо путем затопления водой шахты реактора для внешнего охлаждения корпуса реактора, либо путем установки устройства, обычно называемого ловушкой расплава, с целью исключения больших выбросов радиоактивности. Также для проектов поколения III+ характерно применение двойной защитной оболочки. Из всех проектов, претендующих на звание III+, пожалуй, только ВВЭР-1200, ВВЭР-ТОИ и китайский «Хуалун-1» имеют в наличии все перечисленные опции (у проекта AP1000, например, отсутствует двойная защитная оболочка). Время обеспечения КФБ на пассивных принципах является предметом анализа, о чем пойдет речь ниже.

Первым действующим реактором поколения III+ является шестой энергоблок Нововоронежской АЭС (ВВЭР-1200).

### Найти баланс

Успешное преодоление аварийной ситуации на АЭС зависит от обеспечения сохранности физических барьеров, препятствующих выходу радиоактивных продуктов деления из активной зоны реактора в окружающую среду. Для этого необходимо обеспечить выполнение КФБ: контроль реактивности, отвод тепла, локализацию продуктов деления. Обычно исходят из того, что подкритичность реактора обеспечивается надежной системой аварийной защиты, и основное внимание уделяют отводу тепла от активной зоны и локализации продуктов деления. Различные

Ленинградская АЭС. Оптимальный баланс активных и пассивных систем безопасности является характеристикой энергоблоков с ВВЭР-1200 (поколение III+)



сценарии протекания аварий, в ходе которых могут не обеспечиваться необходимые условия отвода тепла от активной зоны, предъявляют различные требования к набору систем безопасности, необходимых для успешного преодоления аварийной ситуации, вызванной тем или иным исходным событием.

Развитие самого драматичного сценария зависит от возможности удержания расплава (кориума) в корпусе реактора. Опыт аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» показал, что при тяжелой аварии это возможно. Но там было лишь частичное расплавление активной зоны, только часть расплава собралась на днище корпуса реактора и в конце концов затвердела на нем. Для недопущения большого или раннего выброса продуктов деления в окружающую среду при тяжелой аварии в современных АЭС реализуются решения, обеспечивающие сохранение третьего (корпус реактора) и четвертого (контейнент) физических барьеров безопасности. Это означает, что если удержать расплав активной зоны (кориум) в корпусе реактора при тяжелой аварии не получилось, то необходимо локализовать его в пределах контейнента. Это и недопущение проплавления бетонного основания контейнента за счет внедрения устройства локализации расплава (УЛР), и меры взрывобезопасности, предотвращения парового взрыва, взрыва водорода.

Удержание разрушенной активной зоны внутри корпуса реактора в случае тяжелой аварии предполагается осуществлять путем его наружного охлаждения. Предварительными условиями являются низкое давление внутри корпуса реактора, что обеспечивается за счет управления аварией; заполнение шахты реактора достаточным количеством воды и создание контура естественной циркуляции потока охлаждающей воды (эти две меры обеспечиваются конструкцией шахты реактора). Но надо учитывать коварство расплава: он разделяется на фракции — тяжелую, оксидную (соединения с кислородом

### Поколения АЭС



урана и циркония), и легкую, металлическую (сталь и неокисленный цирконий), что приводит к концентрации тепловых нагрузок. Тогда максимум теплового потока придется на границу фракций, и тепловая нагрузка на стенки корпуса в этом месте может быть в 1,5 раза выше. Этот эффект называют фокусировкой теплового потока металлическим слоем.

Если малые и средние реакторы в этом и других случаях еще можно охладить циркуляцией воды в шахте, то для больших установок гарантировать достаточность этих мер невозможно. Поэтому разработчики реакторных установок применяют ряд мер для обеспечения охлаждения корпуса водой. Но эти возможности не бесконечны, поэтому для проектов АЭС большой мощности не следует рассчитывать на целостность корпуса реактора, и нужны устройства локализации расплава. УЛР предусмотрены в проектах современных АЭС с ВВЭР (АЭС-2006, ВВЭР-1000 (В-312, В-412, В-428)), а также в проекте EPR-1600 и в европейском варианте корейского проекта APR1400 (EU-APR).

Но концепции ловушек в АЭС-2006 и в EPR-1600 принципиально различаются. В АЭС-2006 УЛР расположено в подреакторном пространстве и представляет собой конструкцию, заполненную жертвенным материалом. В целом эта схема уже многократно описана, а монтаж ловушки на каждом новом строящемся блоке — хороший повод опубликовать релиз с напоминанием о приоритете безопасности. Этой возможности лишены наши зарубежные партнеры: в EPR-1600 под реактором предусмотрено отдельное помещение (камера охлаждения кориума), куда кориум должен стекать через наклонный желоб и растекаться для лучшего охлаждения и предотвращения взаимодействия с бетонным основанием контейнента. Пол этой камеры выложен чугунными плитами, они охлаждаются водой снизу, а сверху покрыты слоем жертвенного бетона. Сверху растекшийся кориум заливается водой. Но, чтобы все

сработало правильно, кориум должен вытечь из корпуса реактора одновременно. Потому что если часть кориума придет в камеру, залитую водой, то может произойти паровой взрыв с разрушением контейнента. Это накладывает существенное ограничение на сценарий протекания тяжелой аварии применительно к EPR-1600. Тем не менее наши партнеры сэкономили, отказавшись от вне реакторных устройств локализации расплава, уменьшили номенклатуру требуемого оборудования, снизили затраты на транспортировку и монтаж и выиграли в высоте контейнента несколько метров, необходимых для УЛР при нашем подходе. Отказ от УЛР сокращает капитальные затраты на возведение блока до 10% применительно к ВВЭР. Но хорошо ли это с учетом приоритета безопасности над экономикой?

Кроме того, фактически длительное обеспечение безопасности на пассивных принципах реализовано не во всех проектах, претендующих на «плюс» к своей «тройке». Например, в проектах EPR-1600 и APR1400 применение пассивных систем безопасности ограничивается пассивной частью САОЗ (гидроемкостями) и не обеспечивает достаточное время выполнения критических функций безопасности на пассивных принципах. Поэтому отнесение проектов EPR-1600 и APR1400 к проектам поколения III+ является спорным.

Другой пример — AP1000, в котором используются только пассивные системы безопасности с незначительным количеством активных элементов, служащих для инициирования срабатывания пассивных систем. Это существенно снижает вклад потери внешних источников энергоснабжения, включая полное обесточивание станции, в частоту повреждения активной зоны. Но авария на АЭС «Фукусима-1» продемонстрировала, что применение пассивных систем безопасности не является универсальным рецептом, поскольку протекание физических процессов, на которых основано функционирование таких систем, требует определенных условий — достаточного давления в корпусе реактора, отсутствия неконденсируемых газов, наличия достаточного запаса воды для длительного функционирования системы.

Время действия и эффективность пассивных систем в ряде случаев ограничивается запасом воды в резервуарах этих систем. В частности, в проекте AP1000 внешнее охлаждение герметичной оболочки из бака, установленного в ее верхней части, ограничено по времени (96 часов). За границей этого интервала времени требуется пополнение бака, что возможно только с помощью активных средств, которые в проекте не отнесены к средствам, важным для безопасности.

Поэтому оптимальным видится баланс активных и пассивных систем безопасности. Именно он характерен для современных ВВЭР-1200, где для обеспечения современного уровня безопасности использован принцип построения защитных систем, основанный на выполнении каждой основной функции безопасности и активными, и пассивными системами, функционирующими независимо друг от друга. Обеспечена

### Состав активных и пассивных систем безопасности проектов АЭС поколений III / III+

Проект	ВВЭР-1200		«Хуалун-1» (HPR1000)	EPR-1600	APR1400	AP1000, CAP1400
	В-491 (ЛАЭС-2)	В-392М (НВАЭС-2)				
<b>Аварийный впрыск в 1-й контур</b>	Активный + пассивный	Активный + пассивный	Активный + пассивный	Активный + пассивный	Активный + пассивный	Пассивный
<b>Система аварийного ввода бора</b>	Активная	Активная	Информация отсутствует	Активная	Совмещена с системой аварийного впрыска	Пассивная
<b>Система отвода остаточного тепла</b>	Активная	Активная (совмещена с САОЗ НД)	Информация отсутствует	Активная (совмещена с САОЗ НД)	Активная	Пассивная
<b>Отвод тепла от 2-го контура</b>	Активный + пассивный	Активный + пассивный	Активный + пассивный	Активный	Активный	Отсутствует
<b>Конечный поглотитель тепла СПОТ</b>	Баки СПОТ	Атмосферный воздух	Баки СПОТ	—	—	—
<b>Система охлаждения ГО</b>	Активная + пассивная	Активная	Активная + пассивная	Активная	Активная	Активная
<b>Удержание расплава в корпусе реактора</b>	Не предусмотрено	Не предусмотрено	Предусмотрено	Не предусмотрено	Не предусмотрено	Предусмотрено
<b>Устройство локализации расплава</b>	Есть	Есть	Нет	Есть	Нет (есть у EU-APR)	Нет

возможность выполнения пассивными системами функции аварийного охлаждения активной зоны в течение длительного времени, а аварийный отвод тепла при герметичном первом контуре не ограничен по времени.

### На твердую четверку

Блоки поколения III+ достигли впечатляющих результатов по надежности и безопасности, но и они не идеальны (поэтому и ловушки, поэтому и множество систем, и т.д.). Пути выхода из технологической парадигмы, возможности повышения безопасности в которой, по-видимому, близки к исчерпанию (при всем нашем уважении к ВВЭР и не меньшем — к его зарубежным собратьям), — в будущем развитии технологий поколения IV, которое связывается с внедрением систем, основанных на принципе внутренне присущей безопасности (минимальной зависимости от человеческого фактора), когда реакторная установка не сможет в принципе прийти к запроектной аварии «по внутренним причинам» — потому что она так устроена. Реакторы поколения IV смогут превзойти по безопасности и надежности установки предыдущих поколений за счет устранения или минимизации потенциальных угроз (запасенная энергия давления и температуры, горючесть, критичность, общее количество радиоактивных материалов и пр.). Ожидается также, что установки поколения IV будут иметь преимущество в стоимости жизненного цикла по сравнению с другими источниками энергии. И предполагается, они сведут к минимуму количество ядерных отходов. Впрочем,

есть и свои индивидуальные сложности: «сверхкритический» ВВЭР будет иметь более высокое, чем в современных ВВЭР, давление в корпусе, что потребует дополнительных мер по обеспечению безопасности. Жидкосолевой реактор хорош во всех отношениях, но не имеет двух первых барьеров безопасности — ни топливной таблетки, ни оболочки твэла, и с этим тоже что-то надо будет делать.

Ряд установок поколения IV в России уже на разных стадиях создания — от проектирования до сооружения. По-видимому, кандидат на звание первого в мире коммерческого блока поколения IV большой мощности — это натриевый БН-1200М, который планируется реализовать на Белоярской АЭС. Быстрый реактор со свинцовым теплоносителем — это строящийся БРЕСТ-300, прототип, который позволит оценить и отработать соответствующую технологию. Жидкосолевой реактор планируется построить на Горно-химическом комбинате для утилизации отходов, опять же с целью отработки технологии. Причем с этим первенцем ЖСР можно не беспокоиться об отсутствии таблеток и твэлов — дополнительным барьером безопасности послужит горная выработка, ранее надежно хранившая промышленный графитовый реактор.

И чтобы успеть в гонке за реактором четвертого поколения, стоит сконцентрироваться. Ведь первый ВТГР наши китайские коллеги уже создали — это модульный высокотемпературный газовый реактор HTR-PM (провинция Шаньдун, КНР). Он экспериментальный и малой мощности (210 МВт (э)), но уже работает.

### На фото

Установка устройства локализации расплава на третьем энергоблоке АЭС «Аккую» (2022 г.). В Турецкой Республике ведется сооружение четырех энергоблоков с реакторами российского дизайна ВВЭР-1200





**Степан Квятковский**

Аналитик ЦАИР:

— Можно отметить два обстоятельства, повлиявших на выбор темы «Технологические решения и процессы, используемые на зарубежных предприятиях по переработке ОЯТ» для отчета. Первое — это принятая стратегия по замыканию ядерного топливного цикла (ЯТЦ) и переходу к двухкомпонентной ядерной энергетике, что потребует модернизации существующих и создания новых промышленных мощностей по переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) энергетических реакторов. В этом контексте рассмотрение технических и технологических решений, используемых на зарубежных заводах, может быть полезно и для отечественной отрасли. Второе — на различных международных конференциях и совещаниях иностранными экспертами часто представлялась разрозненная информация о проводимых работах по модернизации действующих заводов или будущие планы по развитию перерабатывающих мощностей. Хотелось провести какую-то систематизацию собранных материалов, понять, где находится мир, а где мы, какие сейчас существуют тренды в этом направлении.

Хотя мы попытались описать основные действующие или действовавшие предприятия и установки в области переработки ОЯТ, с момента зарождения ядерной энергетике их было создано гораздо больше, чем представлено в работе. Кроме того, из-за общей закрытости и чувствительности данного направления не по всем установкам имелось достаточно информации, например по китайским перерабатывающим заводам. С другой стороны, французы и британцы подходят достаточно открыто к публикации собственных материалов. В ряде случаев было так, что поиск какой-либо технической информации, которая занимает в тексте отчета один абзац или одну строку в таблице, занимал несколько дней, но без нее анализ был бы неполным.

Отчет получился достаточно объемным, и в нем много технической информации, что скорее представляет интерес для специалистов отрасли. Однако описание подходов к организации исследований при создании производств, а также информация о планах будущего развития зарубежных мощностей по переработке ОЯТ и о рассматриваемых национальных стратегиях могла бы быть интересна и для руководителей отрасли.

Текст: Роман Жолудь  
Инфографика: источник — ЦАИР

# Иногда оно возвращается

*Что делают в разных странах с отработавшим ядерным топливом*

В связи с глобальным ростом потребности в электроэнергии и трендом на декарбонизацию в мире растет интерес к ядерной энергетике. Одно из самых перспективных направлений ядерной энергетике сегодня — замыкание ядерного топливного цикла с повторным использованием отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Это в перспективе позволит не только снизить расходы, но и сделать ядерную энергетiku более безопасной для окружающей среды. На сегодня промышленные заводы по переработке ОЯТ действуют только в России, Франции, Индии и Китае. В нашей стране принята стратегия развития двухкомпонентной платформы ядерной энергетике, основанная на замыкании ядерного топливного цикла, которая включает модернизацию существующих установок и создание новых мощностей по переработке больших объемов ОЯТ. Предполагается, что это не только уменьшит объемы хранимого ОЯТ и обеспечит топливом новые энергоблоки с реакторами на быстрых нейтронах, но и станет востребованной услугой на международном ядерном энергетическом рынке.

Эксперты Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации» изучили<sup>1</sup> технологические решения и процессы, применяемые на основных зарубежных предприятиях по переработке ОЯТ, а также проанализировали опыт эксплуатации, текущий статус и перспективы развития перерабатывающих заводов.

## Франция: от завода к заводу

Промышленная переработка ОЯТ энергетических реакторов во Франции началась в 1966 году с пуском завода UP2. Изначально на заводе осуществлялась переработка ОЯТ газографитовых реакторов, но позже он был модернизирован для переработки оксидного ОЯТ легководных реакторов и получил название UP2-НАО. Сейчас в стране работают два завода, расположенные на мысе Ла-Аг. В 1990 году был запущен завод UP3, рассчитанный на переработку ОЯТ реакторов типа PWR и BWR из стран Европы и из Японии,

<sup>1</sup> Вахрушин А. Ю., Квятковский С. А., Пономарев А. В. Технологические решения и процессы, используемые на зарубежных предприятиях по переработке ОЯТ / Госкорпорация «Росатом», ЧУ «Наука и инновации», ЦАИР. — М., 2024.

а чуть позже была завершена реконструкция завода UP2-НАО, который получил название UP2-800 и предназначался для переработки ОЯТ легководных реакторов из Франции. Проектная мощность каждого из заводов составляет 800 тонн в год, но в реальности таких показателей удалось достичь только в 1990-е годы, когда активно выполнялись зарубежные контракты. Общая вместимость бассейнов-хранилищ ОЯТ двух заводов составляет 14,4 тыс. тонн топлива.

В основе технологии, которая применяется на этих предприятиях, лежит так называемый трехцикличный PUREX-процесс (Plutonium-Uranium Recovery by Extraction — экстракционное выделение урана и плутония). Структурно каждый завод состоит из нескольких отделений, где последовательно проходят приемка ОЯТ, подготовка его к переработке, резка-растворение и подготовка раствора топлива к экстракции целевых компонентов, выделение урана и плутония и разделение их между собой. Затем урановые и плутониевые продукты проходят окончательную очистку и концентрацию. Кроме того, в процессе используют различные установки для обработки газообразных, жидких и твердых радиоактивных отходов, подлежащих дальнейшему хранению и захоронению.

Несмотря на то что оба предприятия структурно похожи, в их технологических процессах есть различия. Так, завод UP2-800 предназначен для переработки оксидного отработавшего топлива французских реакторов PWR, поэтому там используется только одна линия резки-растворения, так как перерабатывается только один тип ОЯТ. На заводе UP3 имеются две линии для резки топлива с зарубежных АЭС (типа PWR и BWR), потому что оно отличается по размерам. Однако сами процессы резки и растворения идентичны на обоих предприятиях.

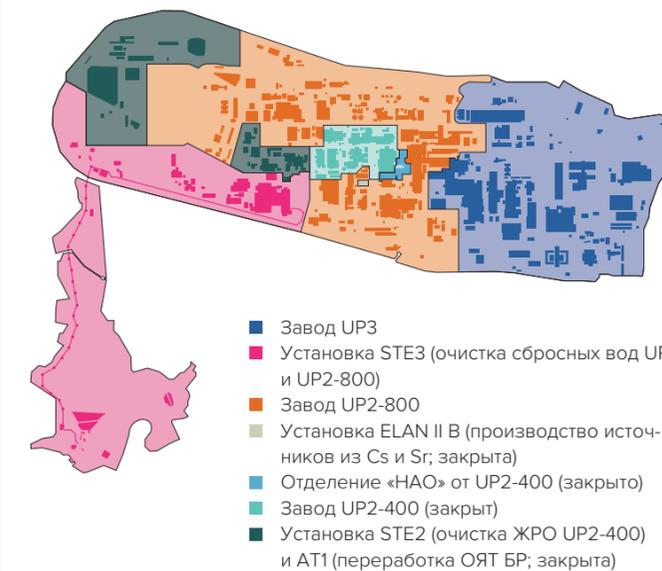
Процесс обработки ОЯТ начинается с того, что отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС), которые привезли с АЭС, подвергаются резке. Это нужно, чтобы топливо, находящееся под оболочкой твэла, смогло в последующем раствориться. В процессе резки осуществляется обдувка азотом, чтобы исключить возгорание мелких частиц.

Далее нарезанные фрагменты ОЯТ попадают в узел растворения, в котором под воздействием азотной кислоты происходит растворение топлива, а оболочки твэлов и другие конструкционные материалы удаляются и направляются в РАО.

После этого смесь обрабатывают на центрифуге для освобождения от осадка твердых частиц. Этот процесс называют осветлением. В итоге получается раствор, который подходит для дальнейшего выделения урана и плутония.

После осветления раствор идет на экстракцию. В процессе используется три цикла экстракции, в ходе которых соединения урана и плутония сначала отделяются от продуктов деления, минорных актинидов и других

Общий план площадки Ла-Аг



элементов, а потом разделяются для дальнейшей очистки. Эти процессы проходят в трех типах оборудования: специальных колоннах, аппаратах смесителя-отстойниках и в центробежных экстракторах.

Из-за сложности физических и химических процессов, протекающих при переработке ОЯТ, для каждого из этапов по экстракции и очистке урана и плутония подходит свой тип оборудования. Например, смесители-отстойники и пульсационные колонны являются относительно простым, требующим минимального технического обслуживания, но очень габаритным оборудованием. В то же время многоступенчатые центробежные экстракторы обладают значительно меньшими габаритами, высокой эффективностью и производительностью, но имеют гораздо более сложную механическую конструкцию, требующую тщательного технического обслуживания, при этом дистанционного.

Поэтому на данный момент центробежные экстракторы используются на французских заводах только на заключительной стадии экстракции — очистки и концентрации раствора, содержащего плутоний. Затем из раствора получают твердый диоксид плутония.

Таким образом, конечными продуктами заводов являются диоксид плутония и раствор уранилнитрата. Оба продукта предназначены для использования в составе топлива для реакторов АЭС. Диоксид плутония применяется на заводах по изготовлению МОКС-топлива — смеси уранового и плутониевого компонентов.

Отдельные технологии используют для обезвреживания радиоактивных отходов, полученных в процессе

Начиная с 1976 года на площадке Ла-Аг было переработано порядка 40 000 тонн ОЯТ, из которых более 10 000 тонн приходится на ОЯТ зарубежных реакторов (Бельгия, Германия, Италия, Нидерланды, Швейцария, Япония). Большую часть переработанного ОЯТ составляет облученное УОХ-топливо реакторов типа PWR и BWR с глубиной выгорания от 10 до 45 МВт-сут/кг и массой сборок от 150 до 500 кг. Также была осуществлена переработка более 80 тонн МОКС-ОЯТ реакторов PWR и BWR и порядка 10 тонн МОКС-ОЯТ быстрого реактора Phénix.

Хотя лицензия на эксплуатацию ядерного центра на площадке Ла-Аг, выданная в 2003 году, ограничивает мощность перерабатываемого ОЯТ UR2-800 и UR3 в 1000 тонн ОЯТ в год для каждого из них и не более 1700 тонн ОЯТ в год суммарно, такие показатели за все время эксплуатации площадки были достигнуты всего пять раз. Резкое снижение объемов перерабатываемого ОЯТ после 2000 года связано с завершением переработки основного объема ОЯТ в рамках выполнения первого цикла зарубежных контрактов.

переработки ОЯТ. В 1960-е годы Франция сбрасывала бочки с ними в море или закапывала в землю, но быстро появившиеся утечки заставили отказаться от этой практики. В 1991 году в стране был принят закон об управлении радиоактивными отходами, который предусматривает жесткие нормативы обращения с ними. За это время во Франции был введен ряд мер, которые помогли уменьшить количество радиоактивных отходов и снизить их опасность для окружающей среды. Так, например, на перерабатывающих заводах внедрили рециклирование реагентов, которое позволило исключить из отходов 25–80% нерадиоактивных компонентов. Были разработаны и внедрены технологии переработки радиоактивных отходов: их концентрирование с помощью различных методов, сжигание, прессование и т.п. Итогом стало фактически восьмикратное сокращение количества конечных радиоактивных отходов на производствах по сравнению с проектными значениями.

Высокоактивные отходы подвергаются остекловыванию при температуре 1300 °С. Сейчас французскими разработчиками создана установка, которая позволяет остекловывать твердые и жидкие радиоактивные отходы прямо в канистрах, в которых они будут захоронены. Технология показала свою универсальность, простоту и экологичность.

Кроме того, Франция построила универсальную установку для извлечения плутония из различных радиоактивных отходов производства, включая золу от сжигания, пыль от фильтров, металлические компоненты оборудования, пластик и др. Извлеченный плутоний отправляется на завод для повторного использования,

а оставшиеся отходы становятся более безопасными и пригодными для захоронения.

### Великобритания: замыкания не будет

Промышленная переработка ОЯТ легководных реакторов в Великобритании началась в 1994 году на заводе THORP (Thermal Oxide Reprocessing Plant). Изначально он строился как коммерческое предприятие по переработке оксидного ОЯТ реакторов типа PWR и BWR в рамках контрактов с зарубежными клиентами, а также ОЯТ газовых реакторов AGR, находящихся в эксплуатации на территории Великобритании. Проектная мощность предприятия составляла 1200 тонн в год. Конечным продуктом завода было МОКС-топливо, которое поставлялось заказчикам.

При создании проекта предприятия разработчики предусмотрели моменты, повышающие его безопасность и надежность. В частности, установки, которые контактировали с радиоактивностью, были спроектированы так, чтобы не требовать ручного обслуживания в течение всего срока службы. Для ремонта оборудования внутри камер использовались дистанционные механизмы, а детали, которые требовали ручного ремонта, обслуживались вне ячеек. Камеры были оборудованы датчиками утечек.

При переработке ОЯТ из отделения хранения попадало в бассейн для подготовки к дальнейшим процессам. Оттуда оно направлялось на резку и выщелачивание и подготовку к экстракционной очистке. Далее следовала экстракция в двух циклах с финальным выделением уранового и плутониевого продуктов и их конверсия в оксиды.

Кондиционирование и ввод топлива в растворитель на заводе THORP производилось в один этап. Оно измельчалось с помощью больших гидравлических ножей на фрагменты в 5–10 см, которые хорошо подходили для растворения. На предприятии использовались три растворителя, через которые последовательно проходило измельченное ОЯТ. Это обеспечивало непрерывный процесс работы: пока в первый растворитель загружалось топливо, во втором происходило растворение, а третий сливал раствор. Для безопасности работы с большим количеством низкообогащенного топлива в растворителе добавлялся поглотитель нейтронов — гадолиний.

После осветления раствора на центрифуге его подавали на экстракцию, где выделяли и разделяли целевые компоненты урана и плутония. В первой экстракционной колонне раствор обрабатывался экстрагентом, затем экстракт промывался азотной кислотой. В отличие от французской технологии, экстракт без специальной очистки в отдельной колонне поступал на реэкстракцию. Затем экстракт проходил очистку и шел на разделение.

Очищенный урановый продукт упаривали, а затем распыляли, получая таким образом порошок

уранилнитрата. Плутониевая линия завода заканчивалась переводом раствора в диоксид плутония.

Оставшиеся от процесса экстрагент, разбавитель и азотная кислота перерабатывались, а высокоактивные отходы остекловывали двумя стадиями. На первой упаренный концентрат кальцинировали, на второй делали конечный продукт из кальцината и стеклообразующих добавок.

На заводе была также построена специальная установка для уменьшения радиоактивности воды, которую использовали для охлаждения бассейнов хранения ОЯТ. Две другие установки предназначались для извлечения актиноидов из жидких радиоактивных отходов с помощью осаждения. Некоторые виды радиоактивных отходов цементировались в бочках из нержавеющей стали для глубинного захоронения.

Однако во время работы завода на нем произошел ряд аварий. Самой крупной стала утечка 83 тыс. литров смеси ОЯТ с азотной кислотой в 2005 году. Из-за частых неисправностей предприятие останавливали, и его реальная мощность ни разу не достигла запланированной в проекте. По этой же причине заводу не удалось выполнить контракты, заключенные с иностранными поставщиками, в срок: свои обязательства по ним предприятие исполнило на девять лет позже. Также возникли проблемы и с производством МОКС-топлива.

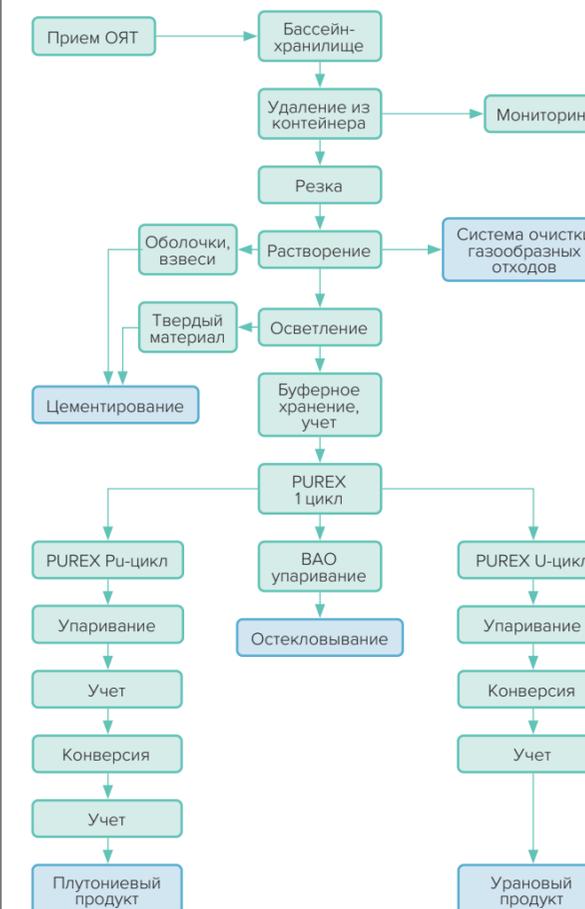
В 2018 году было официально объявлено об окончательной остановке завода THORP. На тот момент все обязательства по переработке иностранного ОЯТ по заключенным ранее договорам были выполнены. Была еще одна причина закрытия предприятия: Великобритания отказалась от замыкания ядерного цикла, поэтому необходимых в переработанном плутонии не было. В стране остановили все быстрые реакторы, а использование МОКС-топлива признали нецелесообразным. Сейчас территория завода рассматривается как площадка для промежуточного длительного хранения ОЯТ до 2070 года.

### Япония: безопасность после «Фукусимы»

В Японии были построены два завода по переработке отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов. Первый, TRP (Tokai Reprocessing Plant), пущенный в 1981 году, выполнен по проекту французской компании SGN, дочернего предприятия компании COGEMA (ныне Orano). Он работал с производительностью 90 тонн в год, хотя в проекте было запланировано 210 тонн в год. В 2006 году работа завода была приостановлена, а в 2016 году было принято окончательное решение о его выводе из эксплуатации. Такое решение приняли из-за того, что модернизация предприятия по новым требованиям безопасности, которые ввели после аварии на АЭС «Фукусима-1», оказалась экономически невыгодной.

Сооружение второго завода — RRP (англ. Rokkasho Reprocessing Plant) по переработке

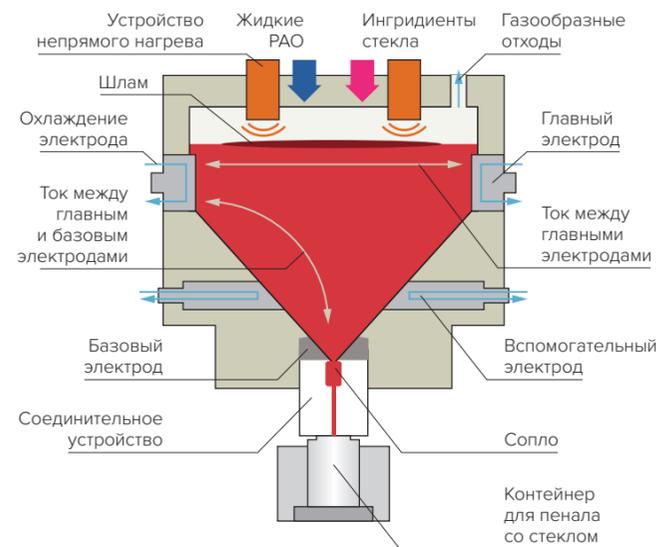
### Обобщенная блок-схема завода THORP



ОЯТ и производству МОКС-топлива — началось в 1993 году, а первые поставки ОЯТ прошли уже в 1998 году. Однако запуск предприятия переносился более 20 раз из-за различных инцидентов: утечки воды из бассейнов хранения топлива, повреждения оборудования для остекловывания, протечки жидких радиоактивных отходов и т.д. Новые правила ядерной безопасности, вступившие в силу после аварии на «Фукусима-1», тоже стали причиной для отсрочки пуска завода, так как ему потребовалась модернизация. По свежим данным, переработка ОЯТ на этом заводе должна начаться в 2027 году. Проектная мощность предприятия — 800 тонн в год, на нее планируют выйти к 2032 году. Производство МОКС-топлива на предприятии ожидается только в 2030 году. Завод будет перерабатывать ОЯТ из японских реакторов.

Структура обоих заводов схожа с французскими аналогами. Но нужно отметить, что в качестве одного из продуктов получают уранилнитрат, а в качестве второго — смесь оксидов урана и плутония.

### Схема печи для остекловывания ВАО на заводе RRP



Оборудование имеет, как правило, модульную структуру, что позволяет быстро заменять отдельные блоки при ремонте. Узел для резки исходного продукта дублируется для обеспечения бесперебойного процесса при проведении ремонтных работ. Растворение топлива проходит в непрерывном аппарате-растворителе.

Высокоактивные отходы на заводе RRP предполагаются остекловывать. Для этого была разработана собственная установка. Особенность применяемого в ней метода заключается в том, что жидкие отходы и стеклянные ингредиенты помещаются непосредственно в плавильную печь. Там одновременно происходит испарение воды и азотной кислоты, а также плавление стекла. По проекту срок работы плавителя должен был составить пять лет. При этом его размеры в пять раз превысили габариты плавителя, используемого на французских заводах. Однако в ходе испытаний разработчики столкнулись с трудностями контроля температуры расплавов печи — не достигалось нужное значение в 1200 °С. Из-за этого расплавленному стеклу требовалось в три раза больше времени, чтобы стечь из плавителя в канистру. Собственно, проблема с установками по остекловыванию является одной из основных причин переноса запуска завода.

### Индия: ориентация на собственные технологии

Особенностью ядерной энергетической политики Индии является ориентация на собственные энергоресурсы и на топливный цикл с использованием как

традиционного уранового или уранплутониевого топлива, так и топлива на основе тория и <sup>233</sup>U. В перспективе индийские власти нацелены на реализацию ториевого ядерного топливного цикла, так как в стране есть большие запасы монацитового песка — минерала, содержащего фосфаты редкоземельных металлов, а также торий и уран.

Первый индийский завод по переработке ОЯТ был построен в 1965 году в Тромбее. Через восемь лет он был выведен из эксплуатации из-за коррозии оборудования, а в 1982 году снова заработал. После реконструкции на нем перерабатывается ОЯТ исследовательских реакторов, расположенных на той же площадке. Здесь также производят ториевое и МОКС-топливо.

В 1982 году на площадке в Тарапуре состоялся пуск второго радиохимического предприятия, предназначенного для переработки топлива энергетических реакторов. Проектная мощность завода составляла 100 тонн ОЯТ в год, однако по разным причинам его реальная загрузка не превышала 20%. В конце 2010 года завод прошел капитальную реконструкцию, а в январе следующего года была введена в эксплуатацию вторая очередь предприятия.

В 1996 году состоялся пуск радиохимического завода в Калпаккаме недалеко от Центра ядерных исследований имени Индиры Ганди. Его проектная мощность составила 100 тонн ОЯТ в год.

Топливо, получаемое на индийских заводах, предназначается, в частности, для строящегося реактора на быстрых нейтронах. Эксперты прогнозируют, что в будущем ядерный парк Индии вырастет в несколько раз, и это поставит новые задачи по переработке ядерного топлива. Поэтому на площадке в Тарапуре строится завод INRP (Integrated Nuclear Recycle Plant), который в Индии считают предприятием с большой производительностью — до 600 тонн ОЯТ в год. На нем, возможно, будет перерабатываться топливо из быстрых реакторов.

Завод INRP интересен и тем, что на нем будут использоваться технологии переработки и обращения с радиоактивными отходами, разработанные в Индии самостоятельно. В проект заложена концепция, по которой оборудование и системы комплекса сгруппированы по их назначению. Например, все испарители устанавливаются в отдельном блоке испарителей. Блочный подход, подразумевающий разделение по процессам, вынос общих служб отдельно от основных зданий, модульный принцип проектирования, обеспечение возможности быстрого дистанционного ремонта и замены деталей оборудования, единый пульт управления комплексом, учет обратной связи от персонала — все это должно дать экономические и технологические преимущества в работе предприятия. Подход позволит сократить общую площадь комплекса и количество персонала, даст возможность привлечения сотрудников для некоторых работ на аутсорс, снизит капитальные затраты при строительстве.

Важная составляющая комплекса — промежуточное хранилище ОЯТ открытого типа. Оно, кроме прочих мер безопасности, включает защиту от землетрясений. Все манипуляции с ОЯТ будут проводиться под водой, а специальные галереи вокруг хранилища будут удерживать уровень грунтовых вод ниже уровня дна хранилища.

Также в комплексе будет реализована инновационная схема прямой подачи топливных элементов из бассейна в горячие камеры, не требующая промежуточных операций с загрузкой и выгрузкой их из контейнеров. Для этой цели предусмотрен подземный тоннель, который будет соединять бассейн и горячие камеры. Вагонетки с ОЯТ будут двигаться по тоннелю и управляться дистанционно.

Разделка отработанных твэлов будет происходить за один проход, а не за несколько, как на остальных индийских заводах. При этом разделочное оборудование будет обслуживаться, ремонтироваться и заменяться без использования ручных операций.

Для обращения с отходами на заводах построены установки для битумирования и остекловывания. В 2006 году в Тарапуре был возведен комплекс для иммобилизации высокоактивных отходов, на котором впервые применили керамический плавитель, который позднее стали использовать и на других предприятиях.

Для изучения решений по переработке ториевого топлива в Индии был создан стенд UTSF (Uranium Thorium Separation Facility). В нем на переработку поступает оксидное ториевое топливо, а процесс предусматривает выделение всех трех компонентов (урана, плутония, тория) переходного этапа от уранплутониевого к торий-урановому циклу.

### Азия развивается, Европа закрывается

В Китае функционирует опытный завод по переработке ОЯТ мощностью 50 тонн в год. Он располагается в провинции Ганьсу, рядом с ним находятся два промежуточных мокрых хранилища на 500 и 800 тонн.

В 2020 году в той же провинции завершилось строительство площадки для мокрого хранения ОЯТ вместимостью 1200 тонн. Планируется, что оно будет принимать ежегодно 200 тонн отработавшего топлива. Также Китай анонсировал строительство хранилища бассейнового типа вместимостью 6000 тонн.

Кроме того, в стране ведется строительство новых предприятий по переработке ОЯТ. Так, в 2015 году началось сооружение демонстрационного завода с проектной мощностью 200 тонн в год. Предприятие возводится по собственным разработкам в Промышленном парке ядерных технологий CNNC неподалеку от хранилища ОЯТ. Предполагается, что он начнет работать уже в нынешнем году. По данным СМИ, также ведется строительство второго завода на той же площадке с такой же производительной мощностью.

### Рассматриваемые к получению целевые продукты на заводе INRP и основные типы РАО



Ввести в эксплуатацию второй завод китайские власти предполагают после 2030 года.

Планируется, что продукты экстракции китайского завода будут использоваться в качестве топлива для исследовательского реактора с быстрым спектром нейтронов и натриевым теплоносителем.

Еще в 2007 году компании Areva (ныне Orano) и CNNC вели переговоры по строительству предприятия по переработке ОЯТ и производству МОКС-топлива с объемом перерабатываемого топлива в 800 тонн в год. Однако за последние пять лет в открытых источниках не появлялась информация об этом проекте. Похоже, что переговоры, длившиеся около 10 лет, не продвинулись дальше меморандумов.

В области захоронения радиоактивных отходов Китай использует смешанную схему. Жидкие низкоактивные отходы битумируют, а твердые среднеактивные сжигают, цементируют и захоранивают.

Сейчас в стране запланировано создание пяти площадок для захоронения низко- и среднеактивных отходов. В настоящее время функционируют три пункта: в Северо-Западном, Юго-Восточном и Юго-Западном регионах. Суммарная их проектная вместимость — 460 тыс. м<sup>3</sup>. В 2022 году завершено строительство первой очереди централизованного пункта для размещения отходов в провинции Ганьсу. Его планируемая вместимость — 1 млн м<sup>3</sup>.

В Южной Корее была создана экспериментальная установка PRIDE, основанная на электрохимической переработке ОЯТ путем электролиза. На основе результатов, которые будут получены при эксплуатации установки, планировалось построить коммерческое предприятие по пирохимической переработке отработавшего ядерного топлива мощностью 100 тонн в год.

В России на Горно-химическом комбинате создается опытно-демонстрационный центр с целью отработки технологий и прототипов промышленного оборудования для переработки ОЯТ



Европейские страны, принявшие решение отказаться от атомной энергии или ограничить ее использование, в основном решают задачи по обращению с отходами. Активные работы по этому направлению остались в прошлом веке.

Кроме представленных выше заводов в Великобритании и Франции, в Германии для переработки ОЯТ в Карлсруэ была построена экспериментальная установка WAK мощностью 35 тонн топлива в год. Ввод в эксплуатацию установки WAK состоялся в 1971 году, а за 19 лет ее эксплуатации было переработано 208 тонн ОЯТ, выделено более 1 тонны плутония и произведено около 60 м<sup>3</sup> высокоактивных отходов, которые постепенно охлаждались в резервуарах из нержавеющей стали.

Итак, подводят итог авторы исследования, зарубежный опыт переработки ОЯТ, с одной стороны, показывает, что эти технологии хорошо изучены и активно используются на промышленном уровне. С другой стороны, видно, что для бесперебойной и безаварийной работы предприятий нужны дополнительные исследования и усовершенствования технологических процессов и оборудования.

Французский опыт показал, что последовательное освоение технологий, учет эксплуатации предыдущих производств, создание лабораторных моделей и полномасштабных макетов для новых технологий стали эффективными стратегиями в развитии переработки ОЯТ. Они позволили за относительно короткий срок построить и ввести в эксплуатацию завод UP3 и обеспечить его безаварийную работу и долговечность используемого там оборудования.

На заводе EUREX, построенном в Италии в 1970 году, перерабатывалось высокообогащенное уран-алюминиевое топливо с исследовательского реактора и низкообогащенное топливо с АЭС «Латина». Общая рабочая загрузка завода составляла 26 тонн ОЯТ в год. Однако в 1984 году предприятие было закрыто. В результате его деятельности осталось 2600 м<sup>3</sup> твердых РАО. Окончательный вывод завода из эксплуатации планируется в 2028–2032 годах.

В 2015 году началось строительство объекта Сетех для жидких радиоактивных отходов. Предполагается, что на нем будет переработано около 260 м<sup>3</sup> отходов, которые затем будут цементированы. Окончательно их планируется переместить в Национальный центр хранения радиоактивных отходов, когда тот будет построен.

Такой подход поможет избежать ненужного консерватизма при проектировании новых заводов, что положительно повлияет на финансовые и временные затраты при их строительстве. При этом необходимо учитывать, что недостаточное изучение влияния даже относительно небольших изменений на уже используемые процессы может привести к ухудшению работы оборудования или даже к невозможности его использовать в дальнейшем.

Особенно актуальным данный подход будет в случае создания инновационных перерабатывающих производств, основанных на технологиях, которые ранее не применялись в промышленных масштабах, а также при проектировании и сооружении заводов, единичная мощность которых значительно превышает аналогичные объекты, находившиеся в эксплуатации ранее.

Текст: Татьяна Тишанинова  
Инфографика: источник — ЦАИР

## От мала до велика

*Исследовательские реакторы — настоящее и будущее*

История мирового реакторостроения началась более 80 лет назад с создания исследовательских реакторов, которые до сих пор остаются высокоэффективным источником нейтронов для исследований и прикладных работ. В последние годы развитие новых инновационных реакторных направлений требует огромного объема материаловедческих исследований, в которых исследовательские реакторы играют определяющую роль. Без нарабатываемых на исследовательских реакторах радиоизотопов невозможно представить развитие ядерной медицины, имеющей огромное социальное значение. В прошлом году отраслевой Центр аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации» (ЦАИР) провел исследование по этой тематике. Первая часть исследования посвящена анализу мировых трендов<sup>1</sup>, вторая — ситуации в России<sup>2</sup>. Мы изучили отчеты Центра аналитических исследований и разработок, рассматривающие проблематику исследовательских реакторов, и знакомим читателей с основными выводами.

Исследовательские реакторы (ИР) являются высокоэффективным источником нейтронов и играют исключительно важную роль в фундаментальных и прикладных исследованиях, а также в получении прикладной продукции, главным образом в наработке радиоизотопов. Анализ зарубежного опыта, в том числе современного состояния зарубежных ИР, их технических характеристик, направлений использования, экономических параметров, представляет ценность при формировании стратегии дальнейшего развития российской атомной отрасли. Мировой опыт показывает, что для так называемых стран-новичков наиболее естественный путь становления национальной ядерной науки и технологии лежит через создание, освоение и экспериментальное использование в стране исследовательских ядерных установок (ИЯУ), в том числе ИР, которые являются

<sup>1</sup> Архангельский Н. В., Пономарев А. В. Перспективы сохранения и развития зарубежных исследовательских реакторов / Госкорпорация «Росатом», ЧУ «Наука и инновации», ЦАИР. — М., 2024.

<sup>2</sup> Архангельский Н. В., Балакирев П. В., Пономарев А. В. Предложения по созданию в России исследовательских реакторов для научных исследований и прикладных работ / Госкорпорация «Росатом», ЧУ «Наука и инновации», ЦАИР. — М., 2024.



**Николай Архангельский**

*Аналитик группы приоритетных направлений научно-технологического развития ЦАИР:*

— Россия в течение многих лет занимает ведущее место в мире в области создания и экспериментального использования исследовательских реакторов. За долгие годы в стране были разработаны и созданы самые разные установки, в которых аккумулированы высокие компетенции и огромный опыт российских специалистов. Многие из установок являются уникальными, и технические решения, реализованные в проектах, послужили важным источником информации для зарубежных специалистов при разработке реакторов. В результате в стране создан сбалансированный парк исследовательских реакторов, который является самым большим в мире и охватывает все направления научных исследований и прикладных работ.

Если обратиться к истории, то можно отметить, что все страны, занимающие ведущее место в ядерной науке и технологиях, стартовали с создания исследовательских реакторов. В последние годы стало еще более очевидным, что без мощных источников нейтронов, какими являются исследовательские реакторы, невозможен прогресс в разработке новых реакторов для атомной энергетики. Поэтому после некоторого «затишья» процесс значительно активизировался в последние годы, и многие страны создают либо перешли к активной фазе разработки исследовательских реакторов. Особую роль эти установки играют в наработке радиоизотопов для медицины, индустрии и науки, причем значимость этого направления постоянно возрастает.

Публикационная активность по данному направлению значительно активизировалась в последние годы, что, с одной стороны, затруднило работу над отчетами, а с другой — предоставило много возможностей для получения актуальной информации и включения ее в отчеты. Авторы постарались в максимальной степени использовать новые источники информации.

ключевым элементом исследовательской ядерной инфраструктуры.

### Сила в многообразии

Первый в мире ИР достиг критичности в 1942 году. В 1950–1960-х годах количество этих установок в мире быстро росло и достигло максимума к середине 1970-х. Всего было построено более 800 ИР в 67 странах. С 1980-х годов наблюдается некоторое сокращение парка ИР, но в последние 15 лет количество действующих ИР остается стабильным, а в развивающихся странах даже несколько возрастает. Крупнейшие парки ИР находятся в России, США, Европе и Китае.

### Использование и классификация исследовательских реакторов

Хотя общая структура направлений использования исследовательских реакторов сохраняется, внутри направлений происходит смещение акцентов.

Исследовательские реакторы используются в трех ключевых направлениях:

- **Фундаментальные исследования.** На ИР было разработано множество методик для исследований, которые позволяют описывать фундаментальные взаимодействия в атомной структуре с возрастающей точностью. Исследования на выведенных пучках нейтронов с помощью рассеяния нейтронов стали одним из первых методов описания детальных характеристик атомных и магнитных структур и динамики для многих важных классов новых материалов. Это значительно улучшило понимание в таких областях, как физика конденсированного состояния вещества, нанотехнологии, наука о полимерах, наука о жизни, исследования в области энергетики, сенсоры, а также биотехнологии и археология. Два вида взаимодействия нейтронов с веществом делают рассеяние нейтронов уникальным методом исследования материалов, а именно сильных ядерных взаимодействий и электромагнитных взаимодействий. Поскольку нейтроны не имеют электрического заряда, они могут проникать в основную массу материалов, делая металлические объекты в значительной степени прозрачными для исследований.
- **Реакторное материаловедение** является наиболее важным применением ИР для ядерной энергетики. Как правило, испытания топливных и конструкционных материалов в условиях, характерных для энергетических реакторов, проводятся в специальной категории ИР, называемых материаловедческими реакторами. Реакторные испытания должны продемонстрировать эксплуатационные характеристики ядерного топлива и конструкционных материалов, которые в настоящее время используются в действующих энергетических реакторах. Для энергетических реакторов следующего поколения и технологий топливного цикла реакторные испытания играют аналогичную роль в разработке нового топлива и материалов.

- **Прикладные задачи.** Прикладные применения, в первую очередь наработка радиоизотопов, занимают важное место в работах на практически всех ИР. Развитие радиоизотопного направления, особенно для ядерной медицины, имеет важное социальное значение и помогает обеспечивать значительную часть эксплуатационных расходов ИР. Также с помощью ИР реализуются задачи в таких областях, как наработка ядерно-легированного кремния для промышленности, нейтронно-активационный анализ, радиационное окрашивание минералов и др.

Классифицировать исследовательские реакторы можно по различным критериям. Так, по мощности исследовательские реакторы можно разделить на:

- **реакторы большой мощности ( $\geq 15$  МВт)** — высокопоточные установки для передовых исследований; они используются наиболее интенсивно и зачастую международными коллективами исследователей;
- **реакторы средней мощности (1–15 МВт)** — наиболее универсальный класс;
- **реакторы малой мощности (< 1 МВт)** — чаще всего используются в образовательных целях.

Также ИР подразделяются на специализированные и многоцелевые. Опыт показывает, что именно многоцелевые реакторы более адаптивны к изменениям научной и промышленной повестки, что особенно важно с учетом 50-летнего срока службы установок.

С точки зрения конструкции самым распространенным видом ИР является бассейновый реактор, отличающийся простотой эксплуатации и легкостью доступа к активной зоне. В России все бассейновые реакторы строились по схеме с опускным движением теплоносителя, обеспечивая мощность до 18 МВт и плотность потоков нейтронов, достаточную для большинства научных и прикладных задач, включая изотопное производство и петлевые испытания. Современные зарубежные проекты RA-10 (Аргентина), PALLAS (Нидерланды), KJRR (Южная Корея) демонстрируют, что интерес к этому типу установок не угасает. Более продвинутые варианты включают подъемное движение теплоносителя, что позволяет увеличить тепловые нагрузки и плотность потоков нейтронов и, соответственно, эффективность исследований.

Другие виды конструкций исследовательских реакторов имеют многие достоинства, но несколько сложнее в эксплуатации. Так, каналные реакторы, такие как польский MARIA, удобны для петлевых испытаний, но менее подходят для фундаментальных исследований. Корпусные реакторы обеспечивают высочайшую плотность потоков нейтронов, однако дороги и сложны в эксплуатации.

К реакторам большой мощности относятся 47 установок в 26 странах, включая 16 реакторов мощностью свыше 50 МВт. Самый мощный действующий ИР — ATR (США, 250 МВт). Наиболее мощные реакторы этого класса обеспечивают сверхвысокую плотность потоков нейтронов, необходимую, например, для производства трансплутониевых радиоизотопов. Часть

мощных ИР выполняет роль прототипов реакторов новых АЭС: они служат платформой для тестирования технологий будущего, включая установки поколения IV. Еще одна подкатегория — установки для облучения в быстром нейтронном спектре, что крайне важно для испытания конструкционных материалов.

Реакторы средней мощности (также 47 установок в мире) часто относятся к бассейновому типу. Они универсальны, удобны для загрузки и выгрузки мишеней, применяемых в производстве радиоизотопов. Мощность реакторов позволяет достичь приемлемых плотностей потоков нейтронов при умеренных эксплуатационных затратах.

Реакторы малой мощности (62 действующие установки) широко распространены за рубежом и служат в основном для образовательных целей. Некоторые из них, такие как SLOWPOKE, MNSR и TRIGA, имеют мощность менее 1 МВт и отличаются низкими затратами на строительство и эксплуатацию. Эти реакторы предоставляют доступ к базовым исследованиям, учебным практикам и, в ограниченном объеме, к производственным функциям.

Большинство ИР использует легководный теплоноситель — простой и надежный вариант, который намного удобнее реакторов с тяжелой водой, жидкими металлами или газами. Важную роль в конструкции играет отражатель нейтронов. Его материал (графит, бериллий, тяжелая или легкая вода) влияет на плотность потока нейтронов. Так, бериллиевый отражатель позволяет достичь плотности потока нейтронов более  $10^{14}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, необходимой для производства некоторых видов радиоизотопов, а тяжелая вода эффективна для создания равновесных нейтронных полей в больших объемах, что востребовано в экспериментах по рассеянию нейтронов и производстве ядерно-легированного кремния.

Для материаловедческих исследований крайне важно наличие петлевых установок, имитирующих реальные условия в ядерных реакторах.

Практически все исследовательские реакторы можно отнести к одной из двух функциональных групп:

1. **специализированные реакторы** — предназначены для:
  - фундаментальных исследований с использованием нейтронных пучков,
  - материаловедческих испытаний для ядерной энергетики;
2. **многоцелевые установки** — гибкие по задачам, часто эксплуатируются в смешанном режиме и как источники радиоизотопов, и как площадки для экспериментальных исследований.

Хотя наработка радиоизотопов — важная функция ИР, специализированные реакторы для этого не строят, что объясняется экономическими проблемами. Радиоизотопы производят на реакторах, ориентированных на исследования и обладающих достаточным нейтронным потоком. Ряд задач (нейтронно-активационный

анализ, радиография, испытания радиационной стойкости и др.) может выполняться даже на установках малой мощности, что делает возможным их интеграцию в университетские и региональные лаборатории.

Эксперты ЦАИР подробно проанализировали существующие направления использования исследовательских реакторов в мире на конкретных примерах установок разных типов. Остановимся на некоторых из этих направлений.

### С беспрецедентной точностью: для науки

Фундаментальные исследования с использованием нейтронов требуют особых условий: высокой плотности потока тепловых, холодных или ультрахолодных нейтронов при минимальном фоновом излучении. Такие характеристики достигаются в реакторах с тяжеловодными отражателями, где формируются направленные пучки — «лучи» нейтронов, позволяющие изучать структуру и свойства материалов с беспрецедентной точностью.

Исторически уровень плотности нейтронного потока в исследовательских реакторах достиг своего потолка еще в 1970-х годах — рекордная плотность составила  $7 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Новые технологические решения, способные превзойти этот уровень, сегодня находятся за пределами традиционных ИР — в ускорительных и импульсных источниках, таких как строящийся ESS в Швеции. Однако и среди действующих реакторов есть установки с выдающимися характеристиками. Например, HFR-ILL (Франция), FRM II (Германия), HFIR (США) и ПИК (Россия) обеспечивают плотность до  $10^{15}$  нейтронов/(см<sup>2</sup>·с) в десятках исследовательских станций. Их важная особенность — работа на высокообогащенном уране (ВОУ), доступ к которому сегодня ограничивается политикой нераспространения.

Среднепоточные реакторы, такие как BRR (Венгрия), MARIA (Польша), MURR (США) и OPAL (Австралия), представляют собой более доступную альтернативу. Хотя они уступают в мощности, их активно используют для научных экспериментов, радиоизотопного производства и подготовки персонала. Такие реакторы чаще работают на низкообогащенном уране, что делает их менее уязвимыми к международным ограничениям. Несмотря на то что исследования с выведенными пучками относятся, как правило, к фундаментальным, их социальная и технологическая отдача огромна. В выполненном в США исследовании доказано, что нейтронные методы внесли вклад в развитие технологий хранения данных, авиации, медицины и производства материалов. Экономический эффект от этих исследований — более чем двукратная окупаемость затрат на эксплуатацию ИР.

Спрос на нейтронные исследования сохраняется, особенно в Европе и Азии, но будущее этого направления в значительной степени связывается не с реакторами, а с ускорительными источниками, где возможно дальнейшее наращивание параметров. Тем не менее пока

такие установки не достигли полной операционной зрелости, и важнейшие реакторы, особенно французский HFR-ILL, остаются опорой нейтронной науки.

**В реальных условиях: для ядерной энергетики**

ИР играют важную роль в развитии атомной отрасли. Они обеспечивают экспериментальную базу для двух ключевых направлений: испытаний топливных и конструкционных материалов, а также валидации новых реакторных технологий — от малых модульных реакторов до систем поколения IV. Разделить такие установки можно на три группы.

- **Критические сборки**, или реакторы «нулевой» мощности, служат для проверки нейтронно-физических расчетов и моделей активных зон. В Европе после закрытия ряда таких установок остались только VENUS-F (Бельгия) и LR-0 (Чехия). С развитием цифровых симуляторов их значение постепенно снижается.
- **Прототипные реакторы** — это уменьшенные версии будущих энергоблоков. Они используются для обкатки проектных решений, но редко применяются вне контекста конкретных проектов и не предназначены для широкого круга исследований.
- **Материаловедческие реакторы** — самые универсальные и востребованные. Благодаря высокой плотности потока нейтронов они позволяют ускоренно испытывать материалы и топливо, моделируя воздействие, эквивалентное многолетней работе на АЭС. В Европе ключевыми остаются BR2 (Бельгия) и HFR (Нидерланды). Также действуют MARIA (Польша), LVR-15 (Чехия) и TRIGA Pitești (Румыния). В США аналогом выступает ATR (до 250 МВт), в Азии — HANARO (Южная Корея) и HFETR (Китай).

Дополнительно к ним используются импульсные реакторы, например CABRI (Франция) и TREAT (США), способные воспроизводить аварийные режимы для оценки поведения топлива.

Несмотря на развитие альтернатив, именно ИР остаются незаменимыми для проверок поведения материалов в «реальных» условиях. Однако из-за закрытия старых установок и нечастых запусков новых существует определенный риск нехватки экспериментальных мощностей в будущем, особенно в Европе.

**Социальная миссия: для здоровья людей**

Наработка радиоизотопов — одна из ключевых прикладных задач ИР, особенно в медицинской сфере. Самый востребованный изотоп — молибден-99 (<sup>99</sup>Mo), используемый более чем в 10 млн диагностических процедур ежегодно только в Европе (для сравнения: количество процедур с использованием других радиоизотопов равно нескольким десяткам тысяч). Производят молибден-99 в ограниченном числе ИР по всему миру — BR2 (Бельгия), HFR (Нидерланды), MARIA (Польша), OPAL (Австралия) и некоторых других. Основная проблема — возраст реакторов, что заставляет прилагать значительные

усилия для обеспечения стабильности поставок. Так, в 2009–2010 годах серия незапланированных остановок реакторов NRU в Канаде и HFR в Нидерландах привела к серьезной нехватке медицинских изотопов.

Экономически производство молибдена-99 на ИР остается убыточным. Цены на облучение не покрывают реальные расходы, и часть затрат компенсируется государствами. Попытки добиться так называемого полного возмещения затрат (FCR) сталкиваются с жесткой конкуренцией и сложной логистикой рынка. Разрабатываются и альтернативные технологии — циклотронные и ускорительные, но они далеки от массовой коммерциализации. Пока молибден-99 продолжают получать преимущественно в реакторах — в условиях хрупкой и дотационной модели, где каждая остановка даже одного реактора может обернуться перебоями в глобальных поставках.

**Мал да удал: для обучения и не только**

Малые ИР — ключевой инструмент в подготовке специалистов для атомной отрасли. Обычно их мощность не превышает 1 МВт, что делает их безопасными и доступными для учебных задач. Эти установки не только демонстрируют основные принципы работы реакторов, но и позволяют проводить калибровку приборов, нейтронную радиографию и другие прикладные эксперименты.

Среди них выделяются три типа. Первый — реакторы нулевой мощности, такие как SUR-100 (Германия) или AGN-201 (Италия), используются преимущественно для базового обучения. Второй — интегральные критические сборки, например VENUS (Бельгия) или LR-0 (Чехия), позволяют моделировать активные зоны и проводить точные нейтронно-физические измерения. Третий — реакторы малой мощности, такие как TRIGA Mark II (Словения, Австрия, Италия), дополнительно применяются в исследованиях и изотопном производстве.

**Это дорого: сколько стоит исследовательский реактор**

Создание ИР — это всегда дорого. Авторы отчета отмечают, что уровень капитальных затрат колеблется от 12 до 45 млн евро на мегаватт тепловой мощности, в зависимости от типа установки, страны строительства и технологического уровня. Например, немецкий FRM II (20 МВт) обошелся в 600 млн евро, а французский JHR (100 МВт), все еще находящийся на этапе строительства, оценивается в 1,8 млрд евро. На фоне этих затрат несколько выделяются реакторы, построенные аргентинской компанией INVAP: OPAL (Австралия) и RA-10 (Аргентина) с относительно низкими удельными затратами, составляющими около 10–12 млн евро за мегаватт.

В целом, несмотря на сложность в получении представительных данных, ясно одно: ИР — это капиталоемкие объекты. Стоимость строительства зависит не только от мощности, но и от назначения, степени

универсальности, а также геополитических и рыночных факторов. Поэтому любые новые проекты требуют детальной экономической оценки и международного сотрудничества.

**В поисках устойчивости: вызовы и перспективы**

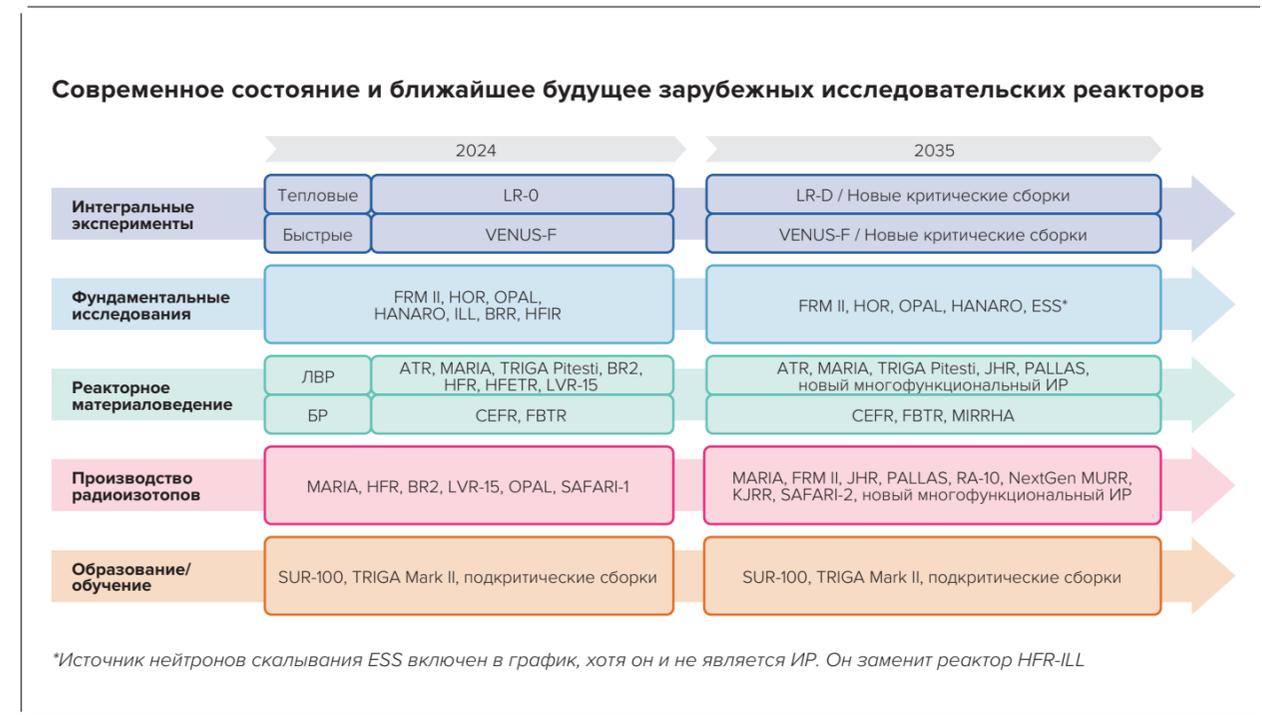
ИР — это не просто научная инфраструктура. Это основа для прогресса в медицине, энергетике, материаловедении и подготовке кадров. На Западе подход к их развитию носит интернациональный характер: кооперация стран, доступ ученых из разных государств и широкое распределение функций между реакторами. Например, Европейский источник расщепления (ESS) строится для фундаментальных исследований, JHR — для испытаний материалов, PALLAS — для изотопов, а MYRRHA — для трансмутации и облучений в быстром спектре.

Однако такой подход сопряжен с рисками: сосредоточение функций на немногих установках делает систему уязвимой к сбоям и задержкам строительства. Отсюда вывод: для устойчивости необходимы не только флагманские установки, но и реакторы средней мощности, способные подстраховывать в случае остановки крупных. В области производства радиоизотопов тоже идет диверсификация: строятся новые реакторы в Аргентине, Корее, Нидерландах, разрабатываются альтернативные технологии. Тем не менее риск дефицита молибдена-99 сохраняется, особенно при неожиданной остановке старых установок.

Подготовка кадров — еще один вызов. Стареющие реакторы малой мощности сохраняются, но используются неэффективно. Их модернизация или замена — вопрос времени и стратегического мышления. Китай сегодня наиболее активный игрок: строит и планирует ИР различного назначения, включая сверхвысокопоточные установки. США ищут пути вернуть лидерство, но сталкиваются с проблемами в финансировании (например, проект мощного реактора VTR фактически заморожен). Европейская стратегия — построение взаимодополняющей сети реакторов. Но в будущем предстоит сбалансировать амбиции с рисками, создавая устойчивую, гибкую и открытую исследовательскую инфраструктуру. Опыт этой стратегии может быть полезен и России, особенно в вопросах международного сотрудничества, планирования замещающих мощностей и интеграции в глобальные научные программы.

**Зарубежная модель развития ИР: логика и тренды**

Как отмечают авторы исследования, модель, принятая за рубежом, основана на четком разделении ИР по направлениям их использования и обеспечивает каждое из них установками, способными закрыть соответствующие задачи. В центре этой модели — установки-лидеры с максимальными плотностями потоков нейтронов и уникальными экспериментальными возможностями. Они формируют основу инфраструктуры и задают научный темп. Дополняют их реакторы средней мощности — менее затратные, но достаточно универсальные, чтобы решать широкий



спектр прикладных и научных задач. Такие реакторы особенно актуальны для стран, где ядерная инфраструктура развита, но ресурсы ограничены, а также в качестве резервной базы даже у научных лидеров.

Радиоизотопное направление считается важнейшим, однако создание специализированных реакторов признано экономически нецелесообразным. Поэтому наработка радиоизотопов осуществляется на многоцелевых ИР, главным образом материаловедческих. Это позволяет эффективно использовать ресурсы и поддерживать устойчивые цепочки поставок.

Новый тренд — обязательная замена стареющих ИР новыми. Если раньше остановка реактора не всегда сопровождалась строительством преемника, то сегодня почти в каждом случае планируется или реализуется новый проект. Причем параметры новых реакторов, как правило, равны или выше параметров предшественников.

Тем не менее строительство новых ИР — крайне сложная и дорогостоящая задача. Стоимость часто достигает десятков миллионов евро на мегаватт, а сроки реализации затягиваются из-за технологических,

регуляторных и финансовых факторов. Это требует долгосрочного стратегического планирования и устойчивого финансирования. Параллельно растет конкуренция со стороны альтернативных нейтронных источников (ускорительных систем) для наработки радиоизотопов. Это требует от ИР четкой фокусировки на задачах, где их преимущества неоспоримы: облучение в различных нейтронных спектрах, сложные материаловедческие тесты и комплексные исследования.

С точки зрения перспектив развития ИР в разных регионах прослеживаются различия. В Европе преобладает кооперативная модель: совместное финансирование, международные консорциумы, открытый доступ. США и Китай, напротив, строят реакторы в основном за счет национальных ресурсов, хотя научное сотрудничество активно развивается. Это связано как с политическими факторами, так и с экономикой: не все страны ЕС могут позволить себе отдельный высокопоточный ИР.

Для оценки сильных и слабых сторон современной ситуации с зарубежными ИР авторы провели SWOT-анализ, результаты которого представлены в таблице.

### Совершенствовать без остановки

Вторая часть исследования посвящена настоящему и будущему ИР России. В условиях реализации стратегических целей госкорпорации «Росатом» особенно важно понимать, как долго еще смогут эффективно работать существующие установки и каким должен быть следующий шаг в развитии парка ИР с учетом накопленного опыта и потребностей на горизонте до 2050 года.

Наша страна занимала и занимает лидирующие позиции в области создания и экспериментального использования ИР. В России сформирована уникальная база ИЯУ, ставшая основой для подготовки инженеров, ученых и становления научных школ мирового уровня. Спустя почти четверть века после последнего системного анализа<sup>3</sup> пришло время взглянуть на парк российских ИР заново — в свете новых задач, развития технологий и долгосрочных планов.

### Ресурс действующих установок

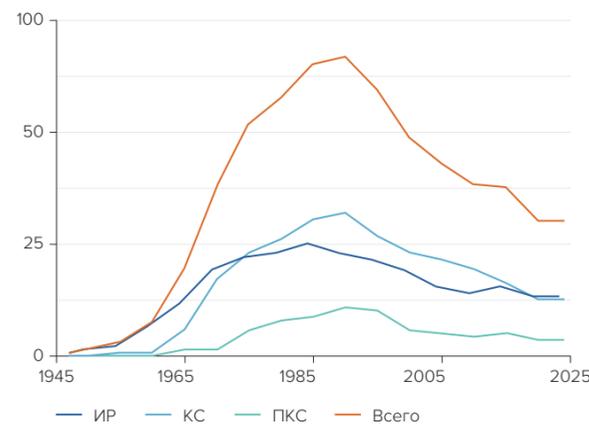
Россия располагает мощным исследовательским потенциалом, но требуется модернизация действующих установок и создание новых, соответствующих задачам XXI века. Это касается задач в области не только фундаментальных и прикладных исследований, но и образовательных функций и подготовки новых кадров, особенно в свете растущего международного интереса к ядерным технологиям. Созданная по поручению госкорпорации «Росатом» рабочая группа формирует стратегию развития исследовательских

<sup>3</sup> Анализ текущего состояния парка исследовательских реакторов России. Тенденции и перспективы развития. — 2001.

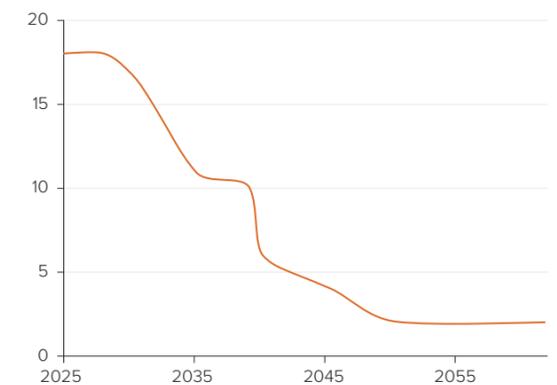
### Результаты SWOT-анализа ситуации с ИР

Сильные стороны ИР	Слабые стороны ИР
Высокий уровень знаний в европейском секторе ИР	Недостаточные связи между разными эксплуатирующими организациями ИР
Разнообразный парк ИР: от критических сборок до реакторов с высокой плотностью потока нейтронов для фундаментальных и материаловедческих исследований по проблемам реакторов на тепловых нейтронах	Неравномерное использование различных ИР
Гибкость некоторых ИР для использования в новых областях (топливные элементы, хранение водорода, малые модульные реакторы, замкнутый ядерный топливный цикл и т.д.)	Относительно низкий средний уровень использования средне- и низкопоточных реакторов
	С расширением возобновляемых источников энергии потребность в легировании кремния в высокопоточных реакторах будет возрастать
Возможности ИР	Угрозы для ИР
Расширение использования действующих ИР за счет увеличения финансирования и привлечения специалистов	Потеря знаний и компетентности по мере старения нынешних высококвалифицированных и образованных кадров
Улучшение взаимодействия между ИР: активно используемые ИР могут перенаправлять часть заказов на недогруженные реакторы	Старение существующего парка ИР, поскольку средний возраст реакторов составляет почти 60 лет
Исследования в новых областях (химическая обработка, топливные элементы, хранение водорода и т.д.)	Потеря знаний и компетентности по конкретным направлениям: окраска драгоценных камней, геохронология, гамма-облучение
	Отсутствие новых ИР (в будущем услуги ИР могут стать недоступными)

Количество действующих ИЯУ в России



Количество действующих ИР в России после 2025 г.



ядерных установок до 2050 года. В ее задачи входит не только оценка текущего состояния парка ИР, но и определение приоритетов будущих разработок.

Парк ИЯУ России складывался десятилетиями. Каждый новый реактор создавался не по шаблону, а как ответ на конкретные научные, технологические или промышленные вызовы, будь то разработка новых материалов, наработка изотопов или решение уникальных инженерных задач. В результате возникла инфраструктура мирового уровня, не имеющая аналогов по разнообразию и масштабу. Действующий парк ИР России охватывает широкий спектр мощностей: от 0,02 МВт (реактор «Аргус») до 100 МВт (СМ-3 и ПИК). Они используются в фундаментальной науке, материаловедении, производстве радиоизотопов, а также для подготовки кадров. Однако некоторые реакторы, несмотря на высокую мощность, не обеспечивают необходимую плотность потока нейтронов или имеют конструкционные ограничения. Это сдерживает реализацию ряда научных и прикладных программ.

Дополняют парк ИР критические и подкритические стенды, используемые для моделирования и обучения. В России действует 17 критических стендов, включая уникальные БФС-1 и БФС-2, которые позволяют проводить исследования как для тепловых, так и для быстрых нейтронных спектров. Подкритические установки в основном находятся в университетах. Почти все отечественные ИР были построены до появления современной нормативной базы, и первоначально сроки их службы не ограничивались. Позже был установлен нормативный срок — 30 лет с возможностью продления после обследования. Сегодня большинство действующих ИР этот срок уже превысили: возраст многих реакторов — 50–60 лет.

Прогнозы по остановке реакторов показывают, что к 2030-м годам может начаться волна вывода реакторов из эксплуатации. Даже с учетом продлений ресурс

большинства ИР будет исчерпан к 2040–2045 годам. В 2028 году ожидается ввод в эксплуатацию многофункционального реактора на быстрых нейтронах — МБИР. История показывает, что 60 лет эксплуатации — не предел для ИР. Примером служит СМ-3, успешно работающий с 1961 года, и зарубежные реакторы LVR-15 (Чехия), BRR (Венгрия), WWR-SM (Узбекистан) — все они прошли 60-летний рубеж и продолжают функционировать после модернизаций. На последней конференции МАГАТЭ (2024 г.) было объявлено о планах эксплуатировать американский АТН (250 МВт) до 2085 года — почти до 120-летнего возраста.

Очевидно, что создание новых ИР — это стратегическая задача. Чтобы сохранить научный и технологический потенциал страны, уже сегодня необходимо планировать замещения: как по мощности, так и по направлениям исследований.

Национальный парк ИР — не только элемент инфраструктуры, но и стратегический ресурс, от которого зависит будущее отечественной науки, медицины, энергетики и высоких технологий. В условиях растущего спроса на ядерные технологии и усложняющихся внешнеполитических обстоятельств перед российскими ИР стоят задачи, значимость которых выходит за пределы научного сообщества. Планирование их развития и модернизации должно отвечать национальными интересам вплоть до 2050 года и далее.

### Направления, задачи и перспективы

Фундаментальные исследования остаются одним из ключевых направлений применения ИР. Современные научные задачи требуют высоких и сверхвысоких плотностей потоков тепловых нейтронов, при этом верхняя граница нужных параметров во многом определяется только техническими возможностями реактора. Максимально значимые научные результаты

получаются на реакторах большой мощности, таких как СМ-3, ИБР-2 и ПИК, однако и реакторы средней мощности (например, ИР-8 и ИВВ-2М) востребованы — в первую очередь как площадки для отработки новых методик, подготовки специалистов и проведения исследований с более низкой себестоимостью пучкового времени.

Перспективным является развитие многоцелевых реакторов бассейнового типа средней мощности от 15 до 30 МВт, которые позволяют сбалансировать задачи академической науки и запросы промышленных заказчиков. Опыт зарубежных нейтронных центров, таких как OPAL (Австралия), FRM II (Германия), NCNR (США), HANARO (Республика Корея), CARR (Китай), демонстрирует, что значительная часть программ реализуется в интересах промышленности. Речь идет о нейтронной радиографии и томографии, которые не имеют конкурентов при неразрушающем контроле топливных элементов и металлоконструкций, 3D-картировании микроструктур твэлов, малоуглового рассеянии нейтронов, нейтронной стресс-дифракции и других методах, применяемых для анализа состояния материалов и оборудования.

Важную роль играют нейтронографические методы для диагностики свойств сталей, радиационно стойких материалов, иммобилизации отходов и анализа фазового состава топлива. Кроме того, данные нейтрон-дифракционных экспериментов становятся важным инструментом для верификации расчетных моделей и кодов, используемых при обосновании ресурса и безопасности атомных установок.

Несмотря на наличие соответствующих компетенций, в России системная работа с промышленностью по линии нейтронных исследований практически не ведется. На базе реакторов ИР-8, ИВВ-2М и ИБР-2 были реализованы отдельные проекты с промышленными партнерами, но они остаются эпизодическими. Между тем зарубежная практика показывает: при грамотном управлении и государственной поддержке такие проекты могут приносить значительные доходы — к примеру, выручка нейтронного центра OPAL от производственной и исследовательской деятельности оценивается в 100 млн долларов в год. Важно, однако, что при этом государственные инвестиции заметно превышают коммерческую отдачу, подтверждая ключевую роль государства в функционировании таких объектов.

Особое значение в области фундаментальных исследований имеет реактор СМ-3. Его уникальные характеристики позволяют не только проводить нейтронографические эксперименты на высочайшем уровне, но и нарабатывать стартовые изотопы для получения трансплутониевых элементов и радиоизотопов со сверхвысокой удельной активностью. Кроме того, именно здесь проводятся исследования в области физики нейтрино.

Реакторное материаловедение — еще одно стратегическое направление. Исследования в этой области

позволяют не просто анализировать состояние конструкционных и топливных материалов после облучения, но и формировать обоснование безопасности их дальнейшей эксплуатации в энергетических реакторах. В России сформирована уникальная по масштабу и полноте экспериментальная база: реакторы СМ-3, МИР.М1, ИР-8, ИВВ-2М и БОР-60 позволяют охватить как тепловые, так и быстрые спектры нейтронов, в том числе с различными теплоносителями и параметрами.

Важное значение имеют исследования по изучению коррозионной стойкости материалов в разных теплоносителях, включая свинец и его сплавы, разработке прогнозных моделей, испытаниям перспективного топлива и новых конструкционных материалов.

Наработка радиоизотопов — наиболее коммерчески значимое прикладное направление. Реакторы средней мощности сегодня обеспечивают основу для выпуска широкого спектра изотопов медицинского и промышленного назначения. Производство радиоизотопов сопровождается НИОКР, а также требует гибкого графика загрузки, что делает совместное планирование исследовательских и производственных задач крайне важным. Особую роль играют короткоживущие изотопы, производство которых невозможно на АЭС или в рамках централизованной модели.

Кроме радиоизотопов, растет интерес к другим прикладным применениям ИР. Это, прежде всего, ядерное легирование кремния, востребованное в условиях курса на технологический суверенитет. Стратегия развития электронной промышленности до 2030 года предусматривает создание отечественного производства кремниевых подложек, в том числе с использованием ядерного легирования. Однако в России пока отсутствуют технологии легирования крупных слитков (200–300 мм), а существующие реакторы не обладают необходимой конструкцией — тяжеловодный отражатель, обеспечивающий равномерное легирование, пока не применяется. Включение этой задачи в программу развития ИР представляется актуальным шагом.

Значимым направлением остается радиационное окрашивание минералов, прежде всего топазов. Восточноазиатский рынок демонстрирует высокий спрос, и российские реакторы могли бы обеспечить его, особенно с учетом отработанных технологий на установках, подобных РБТ-6. Также сохраняет актуальность нейтронно-активационный анализ, используемый в геологии, металлургии и экологии. Примером его успешного применения служит реактор РГ-1М, эксплуатировавшийся на Норильском горно-металлургическом комбинате почти 30 лет. Несмотря на международный интерес к сотрудничеству с промышленностью, в России такие модели пока не развиты. Основной причиной является недостаточный объем проводимых НИОКР в индустрии. Спрос на исследования с использованием нейтронных пучков может быть сформирован только при наличии

соответствующих заказчиков — от авиационных и трубных заводов до химических и энергетических предприятий.

## Стратегия на XXI век

ИР позволяют проводить эксперименты в области ядерной физики, материаловедения, медицины, промышленности, а также формируют компетенции и суверенные технологии. Сегодня, когда значительная часть установок приближается к предельным срокам эксплуатации, назрела необходимость формирования системного подхода к обновлению реакторной базы, делают вывод эксперты ЦАИР. Оптимальный парк ИР должен быть научно обоснованным, сбалансированным по мощности и функциям, многоцелевым, но без избыточного дублирования.

Для начала необходимо четко определить, какие задачи должны решать российские ИР до середины XXI века. Ключевых направлений — три: фундаментальные нейтронные исследования, реакторное материаловедение и наработка прикладной продукции, прежде всего радиоизотопов. Каждое из этих направлений предъявляет свои требования к типу конструкции и режиму работы реакторов. Поэтому единый универсальный реактор, одинаково хорошо справляющийся со всеми задачами, остается, скорее, теоретическим идеалом. Реальная стратегия должна предусматривать наличие нескольких типов установок, способных работать как в узкоспециализированном режиме, так и гибко переключаться между различными видами деятельности.

Фундаментальные исследования требуют мощных источников нейтронов с высокой стабильностью и качественными пучками — особенно тепловых и холодных нейтронов. Российский реактор ПИК в Гатчине, достигший физического пуска в 2011 году и в ближайшие годы выходящий на номинальную мощность 100 МВт, станет опорной установкой в этом сегменте. Его тяжеловодный отражатель обеспечивает плотности потока тепловых нейтронов, сравнимые с мировыми лидерами — RHF (Франция) и FRM II (Германия). Однако важно, чтобы рядом с ПИК продолжали работать реакторы средней мощности — ИБР-2М, ИР-8 и ИРТ-Г. Их роль состоит в обеспечении более гибкой и экономичной платформы для отработки новых методик, экспериментов прикладной направленности и совместных проектов с промышленностью.

Для задач реакторного материаловедения необходимо наличие как минимум двух типов реакторов: с тепловым и быстрым спектром нейтронов. Испытания для водо-водяных реакторов продолжают успешно проводиться на МИР.М1 и ИВВ-2М, а сверхвысокие плотности потока тепловых нейтронов обеспечиваются на СМ-3. Однако к 2036 году и МИР.М1, и ИВВ-2М достигнут 70-летнего возраста, и, несмотря на техническую возможность продления их работы, необходима замена. В этой роли рассматривается проект «УРАЛ» — реактор средней мощности нового поколения, разрабатываемый АО «ИРМ». Что касается

реакторов с быстрым спектром нейтронов, то ключевая ставка делается на строящийся МБИР — реактор мощностью 150 МВт, который полностью закроет потребности в испытаниях перспективных конструкционных материалов и топлива на быстрых нейтронах до конца XXI века. Однако важно обеспечить временное перекрытие сроков эксплуатации БОР-60 и ввода в строй МБИР: в противном случае Россия может временно утратить экспериментальные возможности в этой критически важной области.

Наработка радиоизотопов, несмотря на экономическую привлекательность, требует точного расчета. Большинство используемых для наработки радиоизотопов ИР — ИВВ-2М, ВВР-ц, РБТ — завершат эксплуатацию до 2045 года. Новые реакторы должны предусматривать наличие радиоизотопной программы с самого начала. Однако строительство специализированного изотопного реактора нецелесообразно — опыт зарубежных стран показывает, что подобные проекты требуют постоянного государственного субсидирования и не могут быть рентабельными в изоляции от научной повестки. Поэтому будущее за многоцелевыми установками, сочетающими фундаментальные, прикладные и производственные функции, при условии, что эксплуатационные режимы этих функций технологически совместимы.

Стратегическая схема обновления парка ИР России должна опираться на комбинацию крупных и среднегопоточных установок. ПИК и МБИР станут флагманами: первый — в фундаментальной науке, второй — в материаловедении. В то же время необходимо иметь реакторы средней мощности. В частности, такими установками могли бы стать реактор «УРАЛ» как многоцелевой исследовательский реактор и еще один реактор для наработки радиоизотопов.

Финансовая устойчивость нового реакторного парка также требует отдельного анализа. Практика показывает, что эксплуатация ИР не может быть самоокупаемой: даже при наличии экспорта радиоизотопов и научных контрактов доходы покрывают лишь часть операционных расходов. Поэтому базовое финансирование со стороны государства остается важнейшим условием функционирования реакторов. Это требует институциональной модели, при которой финансирование строится на долгосрочных программах, а не только на проектных грантах или договорных заказах.

Если не начать реализацию новой стратегии уже в текущем десятилетии, к 2050 году Россия может остаться только с двумя мощными исследовательскими реакторами — ПИК и МБИР. Остальные установки либо прекратят работу, либо будут нуждаться в дорогостоящей и все менее эффективной поддержке эксплуатации. Создание современных многоцелевых ИР средней мощности обеспечит технологический суверенитет, гибкость научной повестки и экспортный потенциал. Именно такой подход позволит сформировать сбалансированный, функциональный и устойчивый парк ИР, способный эффективно работать во второй половине XXI века.



**Игорь Коновалов**

Советник ЦАИР:

— В той или иной мере вопросы конструкционных материалов для ядерных реакторов затрагивались в предыдущих отчетах ЦАИР, посвященных уранплутониевому и толерантному топливу, топливу АСММ и исследовательских реакторов. Данный отчет в каком-то смысле стал продолжением этой серии. При подготовке отчета использовались как собственные материалы и наработки в этой области, так и материалы ведущих отечественных специалистов и зарубежные источники.

В нашей стране быстрые реакторы успешно работают уже долгое время, и может показаться, что все материалы для них давно созданы, однако нет предела совершенству. Для уже действующих быстрых реакторов с натриевым теплоносителем требуется повышение их технико-экономических характеристик, чему могут способствовать новые конструкционные материалы. Также актуальной задачей является выбор материалов для инновационных быстрых реакторов с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем.

Текст: Алексей Скворцов

## Баланс прочности и безопасности

### От углеродистой стали до вольфрама: материалы атомной эпохи

Развитие атомной энергетики и термоядерных технологий невозможно без совершенствования конструкционных материалов, способных выдерживать экстремальные условия эксплуатации. Реакторы на быстрых нейтронах как ключевой элемент замкнутого ядерного топливного цикла и термоядерные реакторы, очевидно, будут определять будущее энергетики. Однако развитие технологий в данной области напрямую зависит от уровня инженерных решений и разработок новых материалов, обладающих требуемыми прочностными характеристиками, устойчивостью к радиационным воздействиям, коррозионной стойкостью.

В реакторах на быстрых нейтронах сталь подвергается интенсивному радиационному воздействию, что приводит к изменениям ее микроструктуры, охрупчиванию и снижению пластичности. В термоядерных установках материалы испытывают влияние высокоэнергетической плазмы, мощных потоков нейтронов и экстремальных температурных градиентов. Таким образом, обеспечение долговечности и эффективности конструкционных материалов является одной из главных задач ученых и инженеров.

ЦАИР провел масштабный анализ<sup>1</sup> предшествующего опыта и современных тенденций в разработке и применении конструкционных материалов для реакторов на быстрых нейтронах и термоядерных реакторов. В этой статье мы знакомим читателей с ключевыми направлениями отчета, сосредоточившись на основных вызовах, стоящих перед материаловедами, и перспективных направлениях исследований в области создания новых материалов, устойчивых к экстремальным условиям эксплуатации.

#### Радиационное поведение сталей

Разработка и использование сталей в условиях интенсивного радиационного облучения представляет

собой сложную научно-инженерную задачу. В ядерных энергетических установках, особенно в реакторах на быстрых нейтронах, конструкционные материалы подвергаются длительному воздействию высокоэнергетических нейтронов, что приводит к изменению их микроструктуры, механических и физико-химических свойств. Это, в свою очередь, значительно влияет на долговечность и безопасность эксплуатации таких материалов.

К оболочечным сталям, используемым для твэлов в реакторах на быстрых нейтронах, предъявляются строгие требования, поскольку они выполняют ключевую функцию защиты ядерного топлива, предотвращая его контакт с теплоносителем и окружающей средой. Эти материалы должны обладать высокой радиационной стойкостью, то есть демонстрировать минимальное распухание и устойчивость к радиационному охрупчиванию. Им необходимо сохранять прочность, обеспечивая целостность оболочки твэла при механических нагрузках и температурах не только при нормальных условиях работы, но и при перегревах в аварийных условиях. Также важна их совместимость с теплоносителями и топливом, чтобы исключить риск коррозионных процессов.

Современное радиационное материаловедение развивается в направлении глубокого изучения механизмов радиационного воздействия на металлы и сплавы. Особое внимание уделяется изучению радиационных повреждений, подразделяющихся на первичные повреждения и вторичные изменения.

Первичные повреждения возникают в результате столкновения нейтронов с атомами. Это приводит к смещению атомов с их положений в кристаллической решетке и их локальному «перемешиванию», а также к формированию так называемых пар Френкеля — сочетания пустого места в решетке (вакансии) и выбитого атома, осевшего в другом месте. Эти микроскопические нарушения становятся основой для дальнейших изменений свойств материалов. Дополнительно нейтронное облучение провоцирует ядерные превращения, при которых из элементов, входящих в состав стали, образуются новые изотопы, некоторые из которых при последующем радиоактивном распаде выделяют гелий и водород.

На следующем этапе начинают проявляться вторичные радиационные изменения, связанные с эволюцией структуры стали. Вакансии и выбитые атомы могут объединяться, формируя более сложные дефекты. Одно из наиболее серьезных последствий — образование газово-вакансионной пористости. Нерастворимые в кристаллической решетке гелий и водород формируют пузырьки, которые со временем увеличиваются, вызывая распухание материала и ослабляя его.

Кроме того, радиационное воздействие ведет к изменению структурно-фазового состояния стали. Дефекты в виде скоплений легирующих атомов или предвыделений и даже выделений вторых фаз, возникающие в структуре, блокируют движение

**Легирующие** — один из ключевых методов управления свойствами конструкционных материалов, применяемых в промышленности. Добавление различных элементов в состав стали позволяет изменять ее структуру на микроскопическом уровне, добиваясь обеспечения макроскопических характеристик, таких как прочность, коррозионная стойкость, термостойкость и радиационная устойчивость.

Помимо прочего, важно учитывать взаимодействие элементов между собой и с основным металлом, чтобы получившийся сплав соответствовал жестким требованиям эксплуатации. В реакторных условиях материалы подвергаются сложным воздействиям, включая высокие температуры, интенсивное радиационное облучение и агрессивные среды, что требует точного подбора химического состава. Поэтому, в отличие от общепромышленного применения, реакторные стали можно отнести к классу прецизионных сплавов.

дислокаций, из-за чего металл теряет пластичность и становится хрупким.

В результате синергии двух явлений, таких как изменение структурно-фазового состояния под облучением и радиационное распухание, оболочки твэлов могут терять прочность и разрушаться.

Таким образом, отмечается, что совершенствование конструкционных материалов — один из ключевых вызовов для развития ядерных и реализации термоядерных технологий. Ведутся разработки и исследования в области применения наноструктурированных материалов, модификации структуры сплавов для управления радиационными изменениями. Эти исследования играют решающую роль в развитии реакторных технологий будущего, обеспечивая безопасность и эффективность в условиях экстремального радиационного воздействия.

Современные разработки также направлены на создание низкоактивируемых сталей, которые после эксплуатации не будут представлять угрозу в виде долгоживущих радиоактивных отходов. Для этого традиционные легирующие элементы заменяют на другие элементы с быстрым спадом радиоактивности или меньшей наведенной радиоактивностью после реакторного облучения.

#### Эволюция материалов для быстрых реакторов

Наиболее напряженными конструкционными элементами реакторов на быстрых нейтронах являются оболочки тепловыделяющих элементов — твэлов, которые подвергаются воздействию значительного перепада температур и внутренних напряжений

<sup>1</sup> Квятковский С. А., Коновалов И. И., Пономарев А. В. Состояние и перспективы разработки конструкционных материалов для активных зон реакторов на быстрых нейтронах и термоядерных реакторов / Госкорпорация «Росатом», ЧУ «Наука и инновации», ЦАИР. — М., 2024.

от газообразных продуктов деления и распухающего топлива, а также работают при максимальных повреждающих дозах, вызванных реакторным облучением, в основном потоком быстрых нейтронов.

Очевидными требованиями к оболочечным сталям твэлов реакторов на быстрых нейтронах являются стабильность структуры и фазового состояния, высокая механическая прочность, пластичность и сопротивление ползучести. Немаловажными характеристиками являются минимальное распухание материала и его совместимость с теплоносителем. В случае со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем особое значение приобретают коррозионные свойства стали. Также важна технологичность материалов (включая свариваемость и возможность изготовления тонкостенных труб). Все эти аспекты определяют технико-экономическую целесообразность их использования.

В ретроспективе совершенствования сталей для оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах можно выделить несколько ключевых этапов. Первоначальные исследования, проведенные в США в конце 1940-х годов прошлого столетия по проблеме реакторов на быстрых нейтронах, показали, что наиболее перспективным теплоносителем является натрий. Это предопределило развитие натриевых реакторов во всем мире на последующие несколько десятилетий с использованием в качестве конструкционных материалов хромоникелевых нержавеющих сталей, устойчивых к коррозии, как при изготовлении, так и при эксплуатации в реакторах, а также при обращении после облучения.

Соответственно, одной из распространенных групп оболочечных сталей (для оболочек твэлов) в период с 1960-х по 1980-е годы являлись нержавеющие стали этого класса, которые обладают, помимо высокой устойчивости к коррозии, также и приемлемой жаропрочностью. Их основные легирующие элементы включают хром в диапазоне от 15 до 20% и никель в количестве от 9 до 15%. Добавки других элементов вводятся, как правило, для минимизации вредного

влияния использованной технологии (начиная от примесного состава железа, добытого из данного месторождения, и чистоты используемых лигатур до технологии выплавки слитков и последующей термомеханической обработки), а также для повышения служебных свойств.

Однако у хромоникелевых сталей есть ряд недостатков. Под воздействием высокоэнергичных нейтронов они склонны к радиационному распуханию, что может привести к изменению размеров конструктивных элементов активной зоны реактора и их разрушению.

В настоящее время фокус исследований сместился в сторону углеродистых хромистых ферритно-мартенситных сталей, которые показали меньшую склонность к радиационному распуханию. Они упрочняются закалкой и отпуском подобно простым углеродистым сталям и нашли широкое применение в изготовлении режущих инструментов и в деталях общего машиностроения.

Однако данный тип углеродистых сталей больше подвержен коррозии, менее жаропрочен по сравнению с хромоникелевыми сталями и обладает более низким комплексом свойств при аварийном перегреве. Кроме того, этому классу сталей присуще явление низкотемпературного радиационного охрупчивания, связанного со структурной нестабильностью при температурах 400–500 °С.

### Материалы для термоядерных реакторов

В термоядерных энергетических установках конструкции работают в еще более жестких условиях, чем в реакторах на быстрых нейтронах. Конструкционные материалы в термоядерных реакторах должны выдерживать сложные эксплуатационные условия, включая воздействие высокоэнергетической плазмы, мощного потока нейтронов, приводящие к значительным тепловым нагрузкам и механическим напряжениям. Важными характеристиками материалов являются высокая стойкость к радиационному распуханию, механическая прочность при высоких температурах и минимальная активация, позволяющая снизить радиационную нагрузку при обслуживании установки и снятии ее с эксплуатации.

Для термоядерных реакторов типа токамак (перспективная в настоящее время конструкция) критическими элементами являются первая стенка (элемент, обращенный к плазме) и дивертор (элемент, очищающий плазму от «тяжелых» примесей). Эти элементы токамаков работают, помимо мощного нейтронного излучения, при запредельных температурах из-за высокого энергетического потока, постоянно падающего на дивертор и периодически на переднюю стенку, обращенную к нестабильной плазме в переходных режимах.

Материалы и конструкция этих элементов сегодня определяют перспективы развития целого

направления будущего энергообеспечения на основе управляемого термоядерного синтеза.

На первоначальных этапах исследований для этой цели рассматривались легкие элементы, такие как углерод, бериллий и бор, которые не вызвали бы сильного охлаждения плазмы при попадании в нее. Однако со временем стало ясно, что устойчивость таких материалов к эрозии и механическим нагрузкам недостаточна. Перспективным материалом первой стенки сегодня является вольфрам, который отличается исключительной тугоплавкостью. В экспериментах, проведенных с вольфрамовой стенкой на токамаках JET (Великобритания), AUG (Германия), Alcator C-Mod (США), T-10 (Россия), также выявлены эффекты эрозии и образование неоднородных, в том числе пористых, слоев материала, но в меньшей степени, чем у углеродных материалов. Вольфрам также является основным кандидатом для использования в диверторах, поскольку способен выдерживать нагрев до белого каления в процессе эксплуатации.

Однако вольфрам при высоких температурах склонен к рекристаллизации, приводящей к потере механических свойств. Некоторое улучшение его служебных свойств возможно при его легировании. В качестве перспективы могут быть рассмотрены другие тугоплавкие и теплопроводные материалы, например тантал-гафниевый карбид с температурой плавления около 4000 °С, который нашел применение в космической технике, и, возможно, карбонитрид гафния с температурой плавления около 4400 °С.

В проектах термоядерных реакторов следующего поколения для воспроизводства трития предусматривается его наработка непосредственно в камере реактора в специальных устройствах, которые могут быть организованы как отдельная петля с прокачиваемым жидким литием (литиевый бланкет) или в качестве жидкого поверхностного слоя, омывающего поверхность первой стенки из вольфрама (литиевая стенка). При использовании жидкой литиевой стенки необходимо принимать во внимание высокую испаряемость лития и, как следствие, загрязнение им плазмы. Поэтому для жидкометаллического слоя рассматривают сплав олова с литием, который обладает примерно в 1000 раз меньшей скоростью испарения, чем чистый литий.

Вместе с тем, использование этого сплава приводит к снижению допустимой температуры первой стенки для исключения взаимодействия с материалом основы. С точки зрения совместимости с литий-содержащими материалами в лидерах, как и прежде, остается вольфрам.

### Технологические перспективы

Россия сегодня занимает лидирующие позиции в разработке новых конструкционных материалов для активных зон реакторов на быстрых нейтронах. Другие страны, развивающие эти технологии, такие как Китай и Индия, пока не обладают достаточной

экспериментальной базой для полноценного решения задач радиационного материаловедения. При этом прежние традиционные лидеры — США, страны Европы (где в прошлом веке доминировала Франция), а также Япония — из-за отсутствия экспериментальной реакторной базы утрачивают свои позиции, сосредотачиваясь на расчетном моделировании радиационных процессов и имитационном облучении в ускорителях.

Достигнутый мировой уровень разработки конструкционных материалов для реакторов на быстрых нейтронах показывает, что использование хромоникелевых нержавеющих сталей в качестве оболочек твэлов является проблемным направлением для создания экономически эффективного замкнутого ядерного топливного цикла. Главная причина — распухание этих материалов из-за повышенной генерации гелия на природных и радиогенных изотопах никеля, что ограничивает глубину выгорания топлива.

Как показывает опыт США, при замене материала оболочек твэлов на безникелевые ферритно-мартенситные стали и при использовании «податливого» металлического топлива из уранплутониевых сплавов возможно достижение рекордных величин выгорания топлива. Однако эти стали требуют доработки — повышения длительной прочности (жаропрочности) для оксидного и металлического топлива, а также увеличения пластичности для «жесткого» нитридного топлива. Перспективными материалами для достижения целевых значений в замкнутом ядерном топливном цикле при повреждающей дозе в оболочке твэла до 180 сна могут стать ферритные стали, в том числе их модификации при дисперсном упрочнении оксидами.

Одним из ключевых факторов эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах поколения IV со свинцовым теплоносителем является устойчивость оболочек к коррозионно-эрозионному воздействию теплоносителя. В отличие от натрия, тяжелый свинцовый теплоноситель и его химические свойства могут вызывать серьезные проблемы, требующие дополнительного изучения и совершенствования материалов.

Для наиболее нагруженных элементов термоядерных реакторов типа токамак перспективным материалом остается вольфрам, обладающий наивысшей тугоплавкостью среди металлов, однако его хрупкость требует решения ряда технологических проблем. Использование более тугоплавких, чем вольфрам, материалов требует проведения большого количества исследований и технологических проработок с трудно прогнозируемым конечным результатом.

Дальнейшее совершенствование конструкционных материалов для реакторов на быстрых нейтронах и термоядерных реакторов требует комплексного подхода, включающего не только создание новых материалов и конструкций и их испытаний, но и совершенствование технологий их получения с применением элементов искусственного интеллекта.

### Коротко

В целом класс реакторных хромоникелевых сталей, несмотря на продолжающиеся попытки в течение последних десятилетий улучшить их свойства, подходит к своему пределу. Это в определенной степени напоминает ситуацию с разработкой жаропрочных материалов для лопаток реактивных авиационных двигателей прошлого века, где повышение температуры эксплуатации никелевых сплавов на 100 °С было достигнуто за 10 лет, а для последующего повышения рабочей температуры на 50 °С понадобилось уже несколько десятилетий.



**Александр Залужный**

Аналитик группы приоритетных направлений научно-технологического развития ЦАИР:

— В XX веке вплоть до 1980-х годов лидерство в термоядерных исследованиях принадлежало СССР. А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом были сформулированы принципы термоизоляции плазмы магнитным полем и рассчитаны первые модели магнитного термоядерного реактора тороидальной формы, трансформировавшегося впоследствии в токамак. Прототип первого токамака был сооружен в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова в 1955 году. В 1968 году в советском токамаке Т-3А впервые в мире был достигнут термоядерный уровень температуры у электронов и ионов плазмы. В 1979 году в ИАЭ им. И. В. Курчатова был построен первый в мире токамак со сверхпроводящей магнитной системой. Это дало возможность создавать на базе установки квазистационарный термоядерный реактор. В 1990-е годы финансирование исследований в области управляемого термоядерного синтеза (УТС) в России фактически прекратилось и лидерство перешло к крупным зарубежным установкам. Для возвращения на передовые рубежи термоядерных исследований и освоения перспективных термоядерных технологий необходимо ускоренное сооружение установки нового поколения, соответствующей уровню передовых мировых разработок и даже превосходящей его.

В качестве энергоисточника потенциал УТС превышает потенциал реакции деления. Государство, опередившее конкурентов и в полной мере овладевшее технологиями УТС, получит значительные преимущества на мировом энергетическом рынке, в обеспечении энергетической и экологической безопасности и, как следствие, серьезные политические дивиденды. В этой связи обостряется мировая конкуренция на уровне национальных программ УТС.

Идея подготовки аналитического отчета по этой теме была поддержана директором направления научно-технических исследований и разработок госкорпорации «Росатом» Виктором Ильгисонисом, с ним был согласован список стран, включенных в рассмотрение и структуру отчета. В ходе подготовки документа было использовано около 100 источников. Полезность отчета заключается в том, что в одном документе собраны вместе доступные на конец 2024 года данные о национальных программах УТС, а также основные технические характеристики ведущих токамаков мира.

**Текст:** Роман Жолудь  
**Фото:** EUROfusion, ИТЭР  
**Инфографика:** источник — ЦАИР

*Анализ программ развития управляемого термоядерного синтеза в мире<sup>1</sup>, проведенный в прошлом году Центром аналитических исследований и разработок (ЦАИР) частного учреждения «Наука и инновации» (входит в госкорпорацию «Росатом»), показывает, что общей тенденцией в настоящее время является существенная интенсификация исследований и разработок по реализации национальных проектов создания демонстрационных и, в долгосрочном плане, промышленных термоядерных реакторов.*

## На пути к безграничной энергии

*Какие установки для термоядерного синтеза эксплуатируют, разрабатывают и строят в мире*

Исследования в области освоения реакций ядерного синтеза для задач энергетики (так называемый управляемый термоядерный синтез, УТС), несмотря на многолетнюю историю, в последние годы стали объектом повышенного внимания в ведущих мировых державах со стороны властных структур, бизнеса, СМИ и общества в целом. Рассказываем, с чем связано это внимание и когда ожидаются первые результаты.

Наблюдаемая интенсификация исследований и разработок в области УТС не случайна. Во-первых, термоядерная энергетика привлекает отсутствием углеродных выбросов, пониженной радиационной опасностью и принципиальной невозможностью неуправляемого разгона термоядерной реакции. Сюда же можно добавить фактическую неограниченность сырьевых ресурсов для такой энергетики — водород является самым распространенным химическим элементом во Вселенной. Во-вторых, очевидный прогресс в исследованиях, проводимых учеными на демонстрационных установках, показывает возможность перехода от испытаний к промышленному использованию энергии термоядерной реакции.

<sup>1</sup> Журавлев И. Б., Залужный А. А., Пономарев А. В. Национальные программы развития управляемого термоядерного синтеза на основе систем магнитного удержания плазмы / Госкорпорация «Росатом», ЧУ «Наука и инновации», ЦАИР. — М., 2024.

В-третьих, термоядерные исследования сами по себе стали драйвером развития высокотехнологичных секторов экономики.

### Зажечь Солнце на Земле

Освоение управляемой термоядерной реакции стало, пожалуй, самой амбициозной задачей, которую поставили ученые во второй половине XX века. Фактически речь идет об использовании процессов, протекающих внутри звезд. Напомним, что суть термоядерной реакции заключается в соединении ядер изотопов водорода — дейтерия и трития — при сверхвысоких температурах в состоянии плазмы. При этом выделяется большое количество энергии, получить которую, собственно, и стало главной целью исследователей.

Реализация этого процесса на практике сталкивается с несколькими технологическими проблемами. Прежде всего, для осуществления реакции термоядерного синтеза необходимо достаточно продолжительное время удерживать плазму при высокой температуре (выше 100 млн К), чтобы получаемая в результате энергия превысила затрачиваемую на процесс. Кроме того, встал вопрос о материалах, способных работать в условиях, необходимых для осуществления такой реакции. Так появилась идея магнитного удержания плазмы, которая развивалась с середины прошлого столетия. На ее основе советскими учеными была сформулирована концепция токамака — тороидальной камеры (то есть сделанной в виде тороида — объекта, имеющего форму спасательного круга или бублика) с магнитными катушками. Токмак — это замкнутая магнитная ловушка для удержания высокотемпературной плазмы.

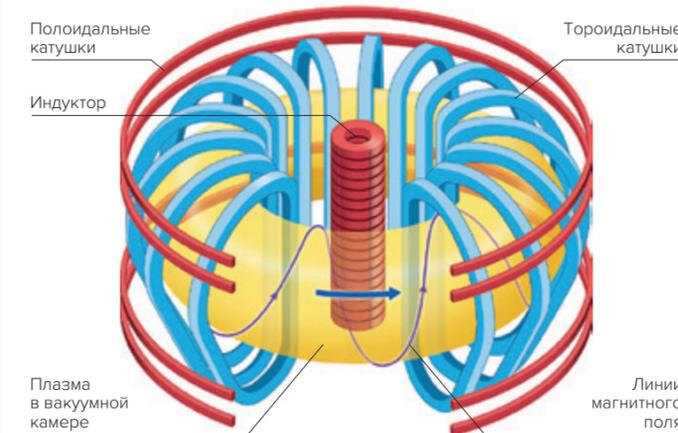
### ИТЭР: всем миром

Самый крупный и известный проект создания токамака реализуется международным сообществом на юге Франции, в Кадараше. Там строится ИТЭР — Международный термоядерный экспериментальный реактор (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER). Его задача — продемонстрировать научную осуществимость генерации термоядерной энергии, а также отработать необходимые для этого технологические процессы. Евросоюз отвечает за 45,6% проекта, еще шесть стран — Индия, Китай, Южная Корея, Россия, США и Япония — вносят равный вклад по 9,09%.

На ИТЭР будут исследовать зажигание термоядерной реакции в дейтериево-тритиевой плазме и ее управляемое горение. Проект также должен продемонстрировать обоснованность концепции тритиевого топливного цикла — системы, которая включает защиту от утечек, улавливание и переработку отходов трития.

На конец 2024 года в проекте было выполнено около 70% дорожной карты по сооружению всего комплекса. Установлены и введены в эксплуатацию большинство систем электропитания, криогенная установка

### Принцип магнитного удержания плазмы в токамаке



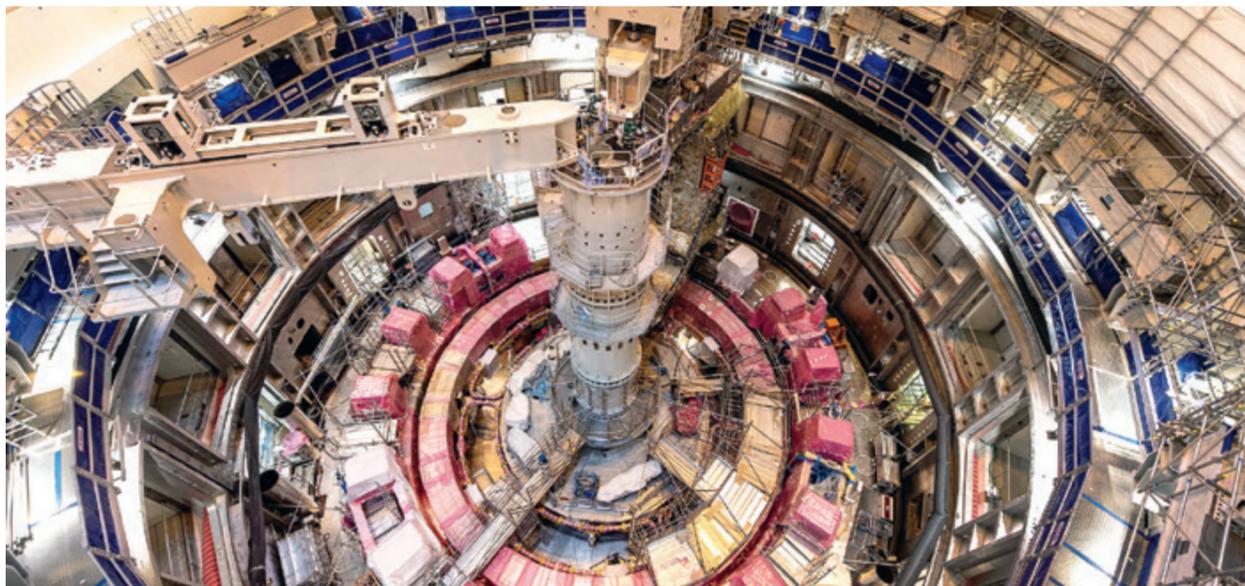
и система охлаждения, поставлены электромагнитные катушки и другие основные компоненты. Однако в процессе монтажа обнаружилось геометрические несоответствия в соединениях в нескольких секторах вакуумной камеры и коррозионные трещины в трубах охлаждения тепловых экранов. Ликвидация этих недостатков, а также поступившие новые предложения экспертов по изменению материалов первой стенки термоядерного реактора привели к замедлению хода сборки токамака. Ожидается, что исследования на токамаке должны начаться в 2034 году.

Все стороны соглашения имеют право на безвозмездное использование результатов интеллектуальной деятельности, полученных в рамках проекта. Уже сейчас каждая страна-партнер применяет разработки ИТЭР при развитии собственной программы управляемого термоядерного синтеза. Необходимость соответствовать высоким стандартам участия в проекте способствует технологическому развитию промышленности каждого участника проекта.

### Актуализированная дорожная карта проекта ИТЭР

- **2034** Начало экспериментов с водородом и дейтериево-дейтериевой плазмой
- **2036** Начало работы с длинными импульсами при полной магнитной энергии и токе плазмы
- **2039** Начало дейтериево-тритиевых операций

Модуль сектора №7 ИТЭР весом почти 1400 тонн — эквивалент четырех полностью загруженных Boeing 747 — опускают в шахту токамака (апрель 2025 г.)



Следующим шагом на пути освоения термоядерной энергетики после экспериментального реактора ИТЭР станет строительство национальных демонстрационных термоядерных станций DEMO (DEMOstration Power Plant). На этом этапе акценты будут смещаться в сторону техники, технологий и экономики производства термоядерной энергии. Индия, Китай, Южная Корея и Япония планируют и разрабатывают демонстрационные станции на базе классического токамака, ориентируясь на запуск к 2050 году. В России и США разработаны концепции токамаков с высоким полем, создаваемым магнитной системой на базе высокотемпературных проводников. Высокое магнитное поле позволит увеличить сжатие плазмы и тем самым сократит затраты на поддержание нужной температуры и значительно увеличит энергетическую эффективность реактора. В России такой установкой является токамак с реакторными технологиями (РТТ), в США это токамак SPARC, уже строящийся на территории штата Массачусетс.

**США: государственное финансирование плюс частные инвестиции**

Термоядерные исследования в США ведутся в национальных лабораториях, крупных корпорациях и университетах. В Соединенных Штатах в 1991–2016 годах успешно эксплуатировался токамак Alcator C-Mod, который до сих пор удерживает мировой рекорд по давлению плазмы. На токамаке TFTR, построенном в Принстонской лаборатории физики плазмы, в 1994 году впервые было продемонстрировано протекание реакции синтеза в дейтериево-тритиевой плазме.

Среди разработчиков и исследовательских центров в стране сейчас выделяется корпорация General

Atomics, которая владеет DIII-D — крупнейшей термоядерной установкой магнитного удержания плазмы в Америке. Она успешно работает с 1986 года и регулярно модернизируется. Радиус установки составляет 1,67 м, мощность нагрева — 23 МВт, а длительность разряда — 5 с.

Основной проект США последних лет — токамак SPARC с радиусом 1,85 м, мощностью нагрева 25 МВт и длительностью разряда 10 с. Установка должна начать работать в 2025 году. Американская компания Commonwealth Fusion Systems (CFS), которая ведет строительство токамака, собирается к началу 2030-х годов создать на его основе небольшую электростанцию.

Стремление к достижению углеродной нейтральности до 2050 года сделало разработки в сфере УТС приоритетным направлением для США. Министерство энергетики страны объявило о национальной стратегии, направленной на создание коммерчески значимой термоядерной экспериментальной установки. Она подразумевает подготовку к коммерческому внедрению термоядерных технологий, создание и использование внешних партнерств. Все большую роль при этом занимает государственно-частное сотрудничество. Предполагается создание соответствующего консорциума, который будет включать как федеральное финансирование, так и частные инвестиции. Начиная с 2021 года средний размер частных инвестиций в термоядерные исследования начал превышать бюджет государственной программы.

**Китай: больше, дольше, мощнее**

У Китайской Народной Республики весьма амбициозная программа развития термоядерной энергетики. В КНР создан первый в мире сверхпроводящий

токамак EAST (радиус — 1,88 м, мощность нагрева — до 30 МВт, длительность разряда — 1000 с), ставший мировым лидером по длительности разряда. На другом токамаке (HL-3) было продемонстрировано достижение температуры ионов свыше 100 млн К.

Для исследования УТС в Китае создан консорциум во главе с Китайской национальной ядерной корпорацией. Он сосредоточит свою деятельность на разработке высокотемпературных сверхпроводников, накопителей энергии большой емкости и производстве трития. В консорциум входят 25 государственных предприятий и исследовательских институтов, в том числе крупнейшие энергетические и сталелитейные компании страны.

КНР одновременно с участием в проекте ИТЭР развивает национальную программу, задачей которой стало первенство в практическом освоении термоядерной энергетики. Национальные исследования будут проводиться на уже существующих установках, а также на китайском термоядерном инженерном тестовом реакторе CFETR. Планируется, что его радиус составит 7,2 м, мощность нагрева — 82 МВт, а длительность разряда — 2000 с. К 2035–2040 годам эта установка должна вырабатывать не менее 200 МВт электрической энергии. Руководством КНР также принято решение о сооружении промежуточной установки — экспериментального сверхпроводящего токамака BEST. Ведется строительство комплекса термоядерных технологий CRAFT, который будет создавать собственное оборудование для реакторов и испытывать все основные технологические системы будущих установок. Комплекс начнет функционировать в полном объеме уже в 2025 году. К 2060 году Китай хочет запустить коммерческую термоядерную электростанцию.

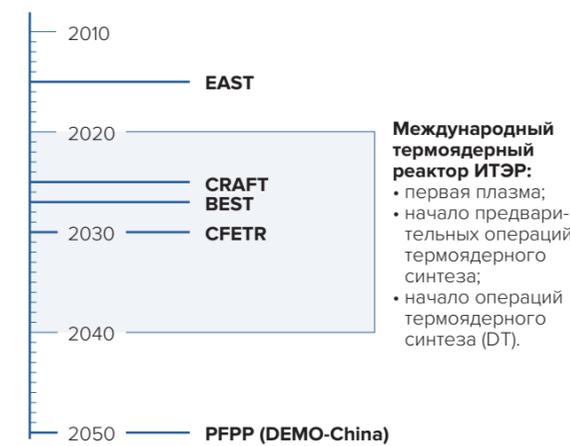
Участвуя в международном проекте ИТЭР, Китай не только отработывает технологии, но и готовит кадры для отрасли: сейчас на площадке для установки во Франции китайские сотрудники занимают второе место по численности после европейских.

**Евросоюз: не только ИТЭР**

Во Франции в 1988–2010 годах эксплуатировался токамак со сверхпроводящей магнитной системой Tore Supra, на котором была достигнута длительность удержания плазмы 365 с. После реконструкции установку переименовали в WEST и начали новые эксперименты в 2016 году. С помощью серии плазменных импульсов продолжительностью около 1 минуты каждый исследователи получили на установке высокий поток нейтронов и подтвердили долговечность вольфрамового дивертора — устройства, удаляющего из внешних слоев плазмы отработанный газ и примеси.

В Испании строится установка IFMIF-DONES, источник нейтронов с энергией 14 МэВ, необходимый для тестирования материалов для демо- и коммерческих термоядерных электростанций.

**Дорожная карта развития УТС в Китае**



Кроме перечисленных выше, в ЕС действует токамак в Германии, сооружается установка в Италии, а также работают два стелларатора в Италии и Германии.

В Евросоюзе отсутствует центральный исследовательский институт, занимающийся изучением термояда, но в целом ядерные исследования традиционно координирует Европейское сообщество по атомной энергии (Euratom), созданное еще в 1957 году. Изучение термоядерного синтеза в Европе развивалось через соглашение с Европейской комиссией, которая выступала здесь как представитель Euratom, финансирующего и координирующего термоядерные программы.

**Дорожная карта развития УТС в ЕС**



Все научные исследования и разработки в Европе финансируются бюджетом Евросоюза. Помимо этого, ЕС финансирует строительство ИТЭР, а также исследования и обучение.

В планах Евросоюза после запуска ИТЭР — сооружение демонстрационной термоядерной электростанции. Она будет последним этапом перед созданием коммерческой термоядерной электростанции. Предполагалось приступить к ее строительству в начале 2040-х годов, но из-за задержки сооружения ИТЭР эти сроки сдвинулись.

### Великобритания: термоядерный Брексит

На площадке Управления по атомной энергии Соединенного Королевства до конца 2023 года эксплуатировался крупнейший и самый мощный в мире токамак JET (Joint European Torus) с радиусом 2,96 м, мощностью нагрева 38 МВт и длительностью разряда 6 с. Эта установка работала с дейтериево-тритиевой плазмой. В последний год его работы был установлен рекорд: удалось достичь выделения энергии термоядерных реакций на уровне 69 МДж. Сейчас установка выводится из эксплуатации после 40 лет успешной работы.

JET имел магнитную систему на основе меди, и это не позволяло проводить длительные импульсы из-за ее перегрева. Ожидалось, что в 2023 году этот токамак уступит место проекту ИТЭР, в котором используется сверхпроводящая магнитная система. Вывод JET

из эксплуатации даст научному сообществу ценную информацию о том, как деградировали материалы в ходе его использования.

После закрытия JET работы по управляемому термоядерному синтезу в Великобритании ведутся на запущенном в 1999 году сферическом токамаке Mega Ampere Spherical Tokamak (MAST, после модернизации в 2020 году — MAST-U). Кроме того, британский стартап Tokamak Energy ставит целью продемонстрировать коммерческую жизнеспособность термоядерной энергетики с помощью компактного сферического токамака с магнитной системой на основе высокотемпературной сверхпроводимости. Программа стартапа предусматривает строительство и развитие сферических токамаков с возрастающей производительностью. Ожидается, что в таких установках плазму можно будет удерживать менее интенсивными магнитными полями за счет их почти шарообразной формы. Это должно привести к уменьшению капитальных затрат на реализацию проекта.

Великобритания после Брексита автоматически вышла из ИТЭР, но продолжает сотрудничество с ЕС в других термоядерных проектах. В сентябре 2023 года она запустила собственную программу по УТС — Fusion Futures. В этот же год было заключено стратегическое соглашение о партнерстве в области управляемого термоядерного синтеза с США.

Страна стремится к созданию прототипа британской термоядерной электростанции, которая должна

к 2040 году продемонстрировать коммерческую жизнеспособность проектов по использованию термоядерной энергии.

### Япония: в поисках энергонезависимости

Уровень самообеспечения энергией у Японии составляет 13,4%. Поэтому энергетическая безопасность для страны — насущная проблема. Ожидается, что термоядерный синтез сможет одновременно решить энергетические и экологические задачи, стоящие перед страной.

Японские достижения в сфере термоядерного синтеза связаны с большим токамаком JT-60 (Japan Torus-60), на котором была получена рекордная температура ионов в плазме. С 2013 года строился новый сверхпроводящий токамак JT-60SA (Super Advanced). Его радиус — 3 м, мощность нагрева — около 40 МВт, а длительность разряда — 100 с. Первая плазма в нем была получена в 2023 году. Он построен и эксплуатируется совместно с ЕС в рамках двустороннего соглашения о «широком подходе» в области исследований термоядерной энергии, заключенного в 2007 году. Его участники договорились поддерживать проект ИТЭР, а также начать исследования для создания технической базы, необходимой для японской демонстрационной термоядерной электростанции.

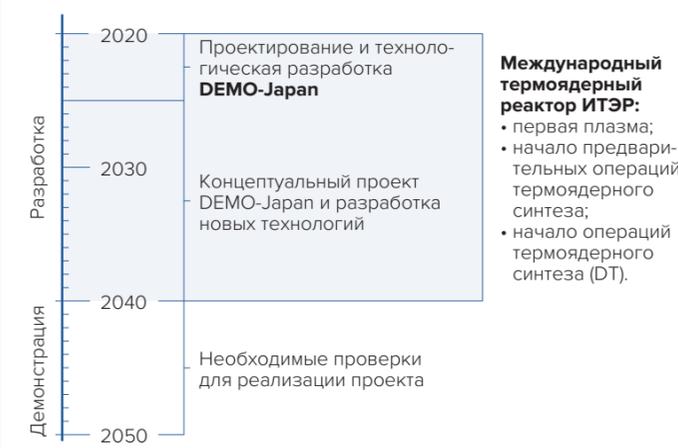
В мае 2023 года Япония утвердила свою национальную стратегию в области термоядерной энергии. В ней учитывается широкое привлечение частного бизнеса к решению и разработкам в этой области. Был создан Японский совет по термоядерной энергии для развития смежных отраслей и разработки принципов регулирования технологий УТС. Япония планирует усилить сотрудничество между промышленностью и научным сообществом, где центральная роль будет отведена национальному институту квантовых и радиологических наук и технологий. Приоритетное внимание будет уделяться образованию в области термоядерной энергетики в национальных университетах, чтобы обеспечить подготовку нового поколения квалифицированного персонала для отрасли. Страна рассматривает США как стратегического партнера в этой сфере.

В 2018 году в Японии была разработана дорожная карта по созданию демонстрационной термоядерной станции, обновленная в 2021 году. Документ собираются снова пересмотреть после 2025 года по результатам работы над ИТЭР, потому что национальная японская программа напрямую связана с этапами реализации международного проекта.

### Южная Корея: прыжок в термоядерное будущее

За последние 20 лет в Южной Корее смогли достичь значительного прогресса в области управляемого термоядерного синтеза. Несмотря на то, что у страны изначально отсутствовали необходимые технологии, с помощью российских специалистов ей удалось

### Дорожная карта развития УТС в Японии



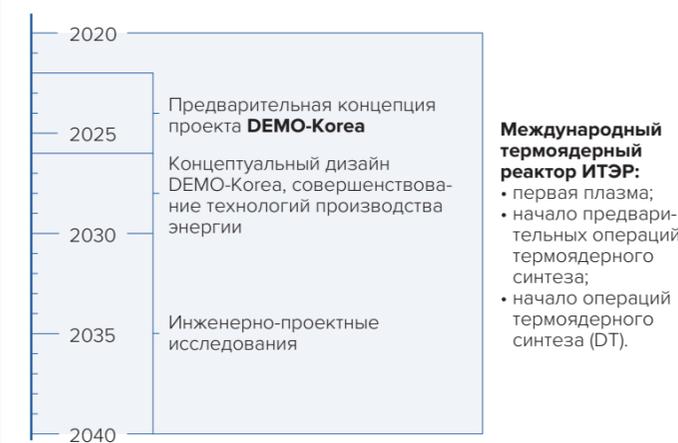
**Международный термоядерный реактор ИТЭР:**

- первая плазма;
- начало предварительных операций термоядерного синтеза;
- начало операций термоядерного синтеза (DT).

создать сверхпроводящий токамак KSTAR (радиус — 1,8 м, мощность нагрева — до 14 МВт, длительность разряда — 90 с). На нем в последние годы были получены рекордные результаты по времени удержания высокотемпературной плазмы. В начале 2024 года на этой установке был модернизирован дивертор. Кроме того, Корея присоединилась к проекту ИТЭР, поставив для него некоторые компоненты.

Как и для Японии, для Южной Кореи освоение и коммерциализация технологий термоядерного синтеза необходимы для развития национальной энергетики и экономики в целом.

### План развития термоядерной энергетики Республики Корея



**Международный термоядерный реактор ИТЭР:**

- первая плазма;
- начало предварительных операций термоядерного синтеза;
- начало операций термоядерного синтеза (DT).

### На фото

Пункт управления токамака JET



У правительства Южной Кореи даже есть амбиции возглавить глобальные усилия по освоению термоядерной энергии. В стране планируется создание собственной демонстрационной термоядерной электростанции примерно к 2050 году. Для этого корейские разработчики используют опыт, полученный в проекте ИТЭР, а также собственные разработки в производстве полупроводников, передачи энергии, инженерного проектирования и т.п.

Сейчас в Корею действует уже четвертый Генеральный план развития термоядерной энергетики на 2022–2026 годы. Он содержит график развития ключевых технологий УТС и ставит конечной целью создание и запуск демостанции. Решение о ее строительстве будет принято после начала эксплуатации реактора ИТЭР.

За финансирование ведущего токамака KSTAR отвечает Министерство информационных технологий республики, а эксплуатацией установки заведует Корейский институт термоядерной энергетики.

### Индия: от угольных электростанций к термоядерному синтезу

Сейчас Индия — импортер ископаемого топлива и активный потребитель угля, в том числе и на своих многочисленных электростанциях. Осознавая необходимость долгосрочного, масштабного и экологичного решения проблемы, правительство страны проявляет большой интерес к термоядерной энергии. В 2022 году Индия разработала национальную энергетическую политику, в которой требуется заместить 4,63 ГВт угольных мощностей до 2027 года.

Управляемый термоядерный синтез с магнитным удержанием плазмы был определен в стране как технология с высоким потенциалом. Правительство инициировало программу, в рамках которой создан Институт исследования плазмы. Его курирует Департамент по атомной энергии страны.

Общая цель индийской программы термоядерного синтеза — развитие жизнеспособной технологии будущего. Участие в ИТЭР является важным этапом на этом пути. В 1986 году в стране был сооружен первый токамак ADITYA, в 2016 он был модернизирован. Сейчас его радиус составляет 0,75 м. Он используется для создания научной и технологической базы для будущих термоядерных установок. Итогами работы токамака станут как научные результаты, так и подготовка персонала для проведения термоядерных исследований.

В 2017 году был запущен сверхпроводящий токамак SST-1 радиусом 1,1 м. Кроме сверхпроводящих магнитных катушек в нем используется усовершенствованный дивертор, а также учтен опыт работы аналогичных установок в других странах. Основное внимание при исследованиях на SST-1 уделяется изучению управления током плазмы.

На основе опыта участия в ИТЭР и собственных исследований Индия планирует создание токамака

SST-2. Мощность термоядерного синтеза в такой установке может составлять 100–300 МВт. Одна из задач SST-2 — продемонстрировать возможности тритиевого цикла, а также испытать технологические компоненты, разработанные в стране, в частности, blanket-размножитель — устройство в термоядерном реакторе для наработки трития. Эксплуатация SST-2 позволит разработчикам заполнить технологические пробелы, которые возникнут на пути от ИТЭР к созданию демонстрационной электростанции.

Кроме того, у эксплуатации SST-2 есть сопутствующая цель. Его предполагается использовать как источник нейтронов для наработки урана-233 из тория-232, а также для трансмутации долгоживущих продуктов деления, то есть превращения радиоактивных ядер в стабильные.

Выполняя долгосрочную Национальную программу термоядерного синтеза, Индия, как и другие страны, планирует приступить к строительству демозлектростанции после реализации проекта ИТЭР. В рамках программы развиваются материалы, радиочастотные и микроволновые энергетические системы, энергетика, системы сбора данных и управления, диагностика плазмы, робототехника, сверхпроводящие магниты, криогенные технологии и др.

Запуск демозлектростанции планируется в конце 2040-х годов.

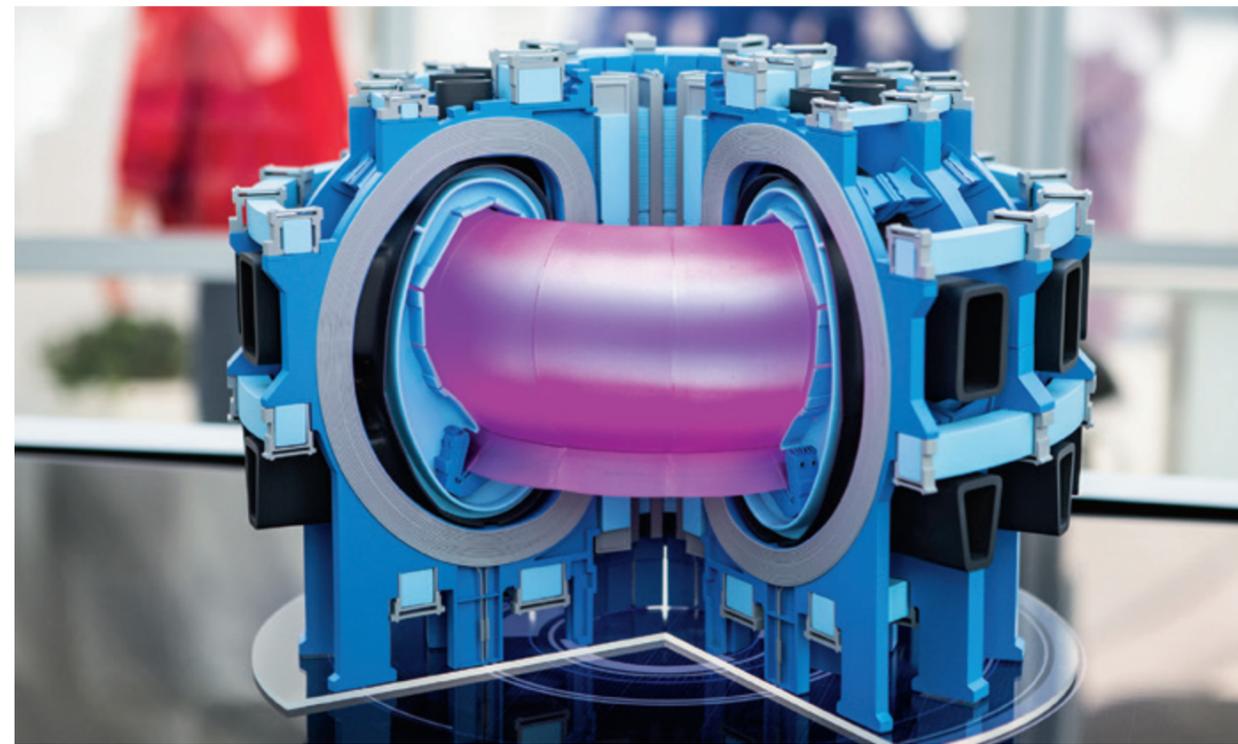
### Россия: догнать и перегнать

Вплоть до 1980-х годов лидерство в изучении термоядерной энергии принадлежало СССР. В 1990-е годы в постсоветской России разработки в УТС фактически не финансировались, и лидерство в этой сфере перешло к другим странам. Вплоть до начала 2000-х годов у Российской Федерации не было существенных достижений в этом направлении. Единственная новая установка, построенная за это время, — малый сферический токамак «Глобус-М». Он был запущен в 1999 году, затем модифицирован в 2017–2019 годах. Также в это время было начато сооружение первого отечественного токамака среднего размера T-15МД, его физический пуск состоялся в 2021 году. Одним из достижений этой установки стало удержание плазмы в разряде с термоядерной температурой электронов более 2 с. Это был рекордный результат для российских установок, а также в мировой практике по выходу на такие показатели с момента энергетического пуска установки.

Начиная с 2021 года исследования в области термоядерного синтеза в России получили большой импульс благодаря федеральному проекту «Разработка технологий УТС и инновационных плазменных технологий». Так в нашей стране появилась первая системная программа в этой сфере.

Токамак T-15МД должен быть выведен на рабочие режимы, оборудован системами диагностики

Макет токамака с реакторными технологиями, представленный на международной выставке «Атомэкспо-2024»



и дополнительного нагрева плазмы мощностью до 25 МВт, что необходимо для получения результатов, отвечающих современному уровню развития термоядерных исследований. Однако, чтобы вернуться на передовые рубежи термоядерных исследований, необходимо создание установки нового поколения. Концепция такого токамака с реакторными технологиями (РТТ) уже разработана. Ее ключевая особенность — магнитная система на основе высокотемпературной сверхпроводимости — позволяет конкурировать с передовыми зарубежными установками.

Проектная документация этого токамака должна быть разработана в 2025 году, а сборка ключевых элементов установки закончится к 2030 году. Преимущество РТТ — объединение в одной установке новейших (в том числе отечественных) технологий и разработок проекта ИТЭР. Исследователи надеются, что использование международного опыта поможет сократить срок строительства.

В середине 2030-х годов РТТ планируют вывести на проектные режимы. К 2045 году разработчики надеются отработать термоядерные технологии для создания реактора и выйти к 2050 году с готовым решением по созданию пилотной термоядерной установки, соответствующей мировому уровню.

Кроме того, РТТ может служить прообразом гибридного реактора. Его концепция состоит в окружении токамака blanketом из урана или тория, в котором

будут поглощаться нейтроны, образующиеся в ходе термоядерной реакции. При этом сырьевые торий-232 или уран-238 будут превращаться в делящиеся изотопы уран-233 или плутоний-239. Нарботанное топливо можно будет использовать в энергетических реакторах деления.

Перспективность разработки таких гибридных реакторов обусловлена тем, что они могут стать основой для формирования новой энергетики при гораздо более низкой радиационной нагрузке, чем в случае переработки отработавшего ядерного топлива. Такие реакторы будут намного безопаснее традиционных ядерных, так как в них исключен неконтролируемый разгон реактора, приводящий к авариям типа чернобыльской. Кроме того, эти реакторы будут выделять очень мало остаточного тепла, таким образом делая невозможной аварию, произошедшую на японской АЭС «Фукусима-1».

Достигнутый в мире уровень разработок и динамика реализации национальных программ делает необходимым принятие в Российской Федерации дополнительных мер с целью восстановления научного и технологического лидерства в области освоения термоядерной энергии, подчеркивают эксперты ЦАИР. Строительство национальной термоядерной установки мирового класса и наличие достаточного количества в стране специалистов, способных ее эксплуатировать, является критически важным для обеспечения технологического суверенитета России в энергетической сфере.

# Добыча по максимуму

## Предложения для максимального извлечения запасов урана

**Задачи, которые решает Горнорудный дивизион «Росатома» (холдинг «Росатом Недр»), — максимизация извлечения полезного компонента на действующих урановых рудниках и на месторождениях Эльконского урановорудного района вкуче со снижением капитальных и операционных затрат. Для этого, в частности, планируют задействовать кучное выщелачивание и локальные сорбционные установки.**

### Кучное выщелачивание на ППГХО

Месторождения Стрельцовского рудного поля, которые в настоящее время обрабатывает Приаргунское производственное горно-химическое объединение (ППГХО) и запасы которых в обозримом будущем истощатся, сложены алюмосиликатными рудами. Руды с более высокими содержаниями урана перерабатывают на гидрометаллургическом заводе (ГМЗ), с более низкими — методом кучного выщелачивания, или, на горняцком сленге, на куче.

Рудник № 6 будет обрабатывать месторождения, сложенные карбонатными рудами, которые отличаются по свойствам от алюмосиликатных, поэтому для них построят новый ГМЗ. С учетом всех этих вводных ППГХО изучает возможность перейти на переработку оставшихся алюмосиликатных руд только на куче.

Кучное выщелачивание применяется на ППГХО с 1974 года для забалансовых (с параметрами, хуже балансовых, чья отработка экономически целесообразна) руд и с 1996 года — для бедных. Главное преимущество этого метода — более низкая, чем у гидрометаллургического, себестоимость. Недостатки — низкие скорость технологического процесса (один штабель перерабатывается порядка 2,5–3 лет) и извлечение (около 30% для забалансовых руд и не более 65% для бедных).

Как рассказал на VI международном симпозиуме «Уран: геология, ресурсы, производство» директор по науке, технологическому и инновационному развитию ППГХО Александр Морозов, чтобы улучшить технологические и экономические параметры извлечения урана на куче, специалисты ППГХО провели исследования по двум направлениям — для забалансовых и бедных руд.

Благодаря им выяснилось, что под влиянием естественных атмосферных процессов куски руды

рассыпаются, уран переходит в мелкую фракцию и перемещается в нижнюю часть штабеля на складе забалансовых руд, так что в выдержанных (стоящих не первый год) штабелях можно извлекать порядка 85–90% металла. Чтобы отделить самые ценные компоненты, перед укладкой штабеля на кучу запустили рудосортировочный комплекс. Благодаря сортировке извлечение выросло с 30 до 70%. Также стали добавлять поверхностно-активные вещества, которые снижают натяжение жидкости, позволяя реагенту глубже проникать в рудные куски, и мешают глинистым частицам (они препятствуют выщелачиванию) загрязнять рудный материал.

Для снижения себестоимости в качестве реагента для закисления кучи использовали отработанные кислые растворы ГМЗ и отработанную серную кислоту одного из сибирских производителей сорбентов. Это позволило в десятки раз снизить расходы на реагенты.

К настоящему времени из 7,5 млн тонн забалансовых руд переработано 4,5 млн тонн, из них произведено 400 тонн урана с себестоимостью ниже, чем по гидрометаллургической технологии, в 2–2,5 раза. Совокупная выгода составила более 1,3 млрд рублей.

Для бедных руд проблема — более высокая плотность руд, из-за чего растворы не могут проникнуть вглубь и растворить уран. Как рассказал Александр Морозов, за год-полтора серная кислота проникает в кусок на глубину не более чем на 5–7 мм. Чтобы решить проблему, попробовали дробление и селекцию рудной массы с помощью рентгенорадиометрической установки на ГМЗ. После сортировки наиболее богатая фракция отправлялась на завод, пустая порода — в отвал, остальное — на кучу. Эти меры вкуче с использованием растворов ГМЗ и переводом транспортировки руды с автотранспорта на конвейеры позволили увеличить извлечение со средних 60 до 85–90%, а срок переработки штабеля с 2,5 лет до 1 года.

После выхода на полную проектную мощность рудника № 6 на кучу можно будет отправлять порядка 500–600 тыс. тонн руды в год и получать порядка 300 тонн урана в год. Это предпочтительный вариант переработки оставшихся алюмосиликатных руд, потому что действующий ГМЗ уже состарился, а его модернизация не имеет экономического смысла. Отказ от гидрометаллургии означает необходимость решить проблему очистки отработанной серной кислоты от примесей и отделить мелкую фракцию от других, перерабатывая ее в отдельных штабелях. Мелкая фракция разрушает тело штабеля и вызывает эффект кольматации (заиливания), поэтому необходимо ее

агломерировать, и это следующая задача, которую предстоит решить. По оценкам, переход к кучному выщелачиванию позволит снизить себестоимость выпуска концентрата урана примерно в полтора раза.

Новый гидрометаллургический завод для карбонатных руд в настоящее время проектируется. Предполагается, что проект будет завершен и получит все разрешения в 2027 году, в 2028 году начнется строительство.

### Кучное выщелачивание на Эльконе

Эльконский горно-металлургический комбинат (ЭГМК) начал отработку руд месторождения Северное кучным выщелачиванием. Но в штабелях вместе с золотом содержится и уран, оставлять который в штабеле нерационально. Как рассказал на симпозиуме начальник отдела технологий и оборудования ЭГМК Василий Кольцов, проведенный опыт показал, что извлекать уран после выщелачивания золота можно, поэтому специалисты ЭГМК, АО «ВНИИПИпромтехнологии», Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева и Всероссийского института минерального сырья им. Н. М. Федоровского выполнили НИОКР по разработке технологии поэтапного кучного выщелачивания золота и урана из эльконских окисленных карбонатных руд бесцианидными реагентами. Технология предполагает, что уран будет извлекаться на тех же штабелях, что и золото, одновременно будет происходить доизвлечение золота.

Специалисты изучили руды, реагенты, выбрали из них самые эффективные, подобрали технологический регламент и провели испытания, которые показали возможность выщелачивания урана по карбонатной, то есть щелочной, а не кислотной, как обычно, схеме. Сравнив зарубежные и российские реагенты, специалисты пришли к выводу, что отечественные, скомпонованные на основе смеси карбонатов, бикарбонатов и перкарбонатов натрия, лучше зарубежных, так как при дальнейшей переработке показатели сорбции урана шестеро выше. Кроме того, стабильность поставок российских реагентов выше.

Исследования показали, что коэффициент извлечения урана кучным выщелачиванием составил 65–70%, золота — 90%. Технологическая схема выщелачивания и сорбции предполагает замкнутый водооборот, что важно для экологической приемлемости проекта. Следующий этап — провести укрупненные испытания в циклических режимах.

### Мобильные сорбционные установки

Предназначение мобильных сорбционных установок (МСУ) — отработка небольших залежей, где стационарные установки использовать нерентабельно из-за высоких капитальных расходов.

Изначально их разработали для извлечения скандия, который вместе с ураном содержится в рудах месторождений «Далура», затем идею решили применить для урана. В 2022 году специалисты «Далура»

и «Русбурмаша» (инфраструктурная компания, входит в «Росатом Недр») разработали МСУ для урановых залежей «Хиагды». В 2023 году ее ввели в опытную эксплуатацию, и она стала стабильно извлекать уран: из продуктивных растворов он осаждается на ионообменную смолу, которую перерабатывают на центральной площадке.

МСУ состоит из модулей-контейнеров с сэндвич-панелями и теплоизоляции. В контейнерах установлены мобильные сорбционные колонны, резервуары для свежего сорбента, продуктивных и возвратных растворов и серной кислоты и передвижная компрессорная установка. В комплект также входят контейнеры для электротехнического оборудования и операторов.

МСУ не нужны заглубленные фундаменты, поэтому их просто и недорого проектировать, согласовывать, устанавливать на площадке из бетонных плит на щебеночной подушке и демонтировать, а также рекультивировать территорию после завершения отработки. Конструкция простая и надежная: срок службы основного оборудования — 20 лет, модули оснащены освещением, отоплением, вентиляцией и автоматикой. Изготавливает, поставляет, выполняет шефмонтаж и пусконаладку и сдает объект одна организация, поэтому организационные неувязки тоже сведены к минимуму.

Продолжение концепции — мобильная сорбционно-десорбционная установка (МСДУ). Она понадобилась для одного из месторождений «Далура». Извлеченные продуктивные растворы отличаются высокой коррозионной активностью, поэтому их лучше перерабатывать отдельно от остальных. МСДУ уже разработана, идет подготовка площадки, летом начнутся строительно-монтажные работы.

МСДУ будет выпускать не насыщенную ионообменную смолу, как МСУ, а продукт следующего периода — товарный десорбат. Для МСДУ планируют использовать U-образные колонны и размещать не в отдельных модулях, а в утепленном облегченными материалами общем корпусе. Если первый пример окажется успешным, МСДУ будут использовать для отработки и следующих по очереди месторождений, не тратя ресурсы на капитальное строительство, а на стационарное предприятие привозить только товарный десорбат для сгущения, фильтрации и сушки.

### Автомобильная сорбционная установка

На симпозиуме главный эксперт «Гиредмета» Валерий Головкин предложил собрать МСУ на платформе грузовых автомобилей, установив сорбционные колонны в наклонном положении на прицепе. Это нетипично, обычно их устанавливают вертикально. Чтобы подтвердить реализуемость идеи, Валерий Головкин и его команда провели лабораторные и опытно-промышленные работы, разработали технологию, определив технологические параметры, уточнив конструкционные особенности и получив данные о технологическом процессе.

Текст: Евгений Рожков  
Фото: ЭХП

# Проверочная работа

В Лесном готовы испытывать оборудование для нефтяников



## На фото

Команда создателей испытательного центра

На комбинате «Электрохимприбор» создали не имеющий аналогов в России испытательный центр. Здесь будут испытывать геонавигационные приборы, входящие в состав роторно-управляемых систем, жизненно необходимых для бурения сверхглубоких нефтяных скважин. «Вестник атомпрома» обсудил с Сергеем Медведчуком, начальником цеха, в котором расположен испытательный центр, как на стендах имитируют жесткие условия скважин и когда на комбинате начнут выпускать роторно-управляемые системы собственной разработки.

— Сергей, расскажите, с чего все начиналось. Как на предприятии пришли к выводу, что ему нужен испытательный участок?

— В 2017 году руководителями нашего предприятия было принято решение об открытии нового производства по выпуску геонавигационных приборов, широко востребованных в нефтегазовой отрасли нашей страны. За несколько лет комбинат прошел путь от проведения опытно-конструкторских работ до серийного выпуска геонавигационной продукции. Перед отгрузкой потребителю нужно было проводить испытания. Не имея комплекса необходимого оборудования, комбинат проводил испытания в сторонних организациях, что существенно затрудняло логистику и требовало дополнительных средств и времени. К тому же не всегда имеющееся у сторонних организаций оборудование отвечало всем нашим требованиям.

Поэтому создание испытательного участка выглядело как логичный и нужный шаг. Были выделены средства для этого, возведено здание для участка, и в его стенах смонтировано испытательное оборудование.

— Геонавигационный прибор является частью роторно-управляемой системы?

— Да, сейчас мы выпускаем отдельные приборы, которые входят в состав роторно-управляемых систем. Наши приборы в части программного обеспечения совместимы с электроникой всех роторно-управляемых систем, которые используются в отечественных нефтяных компаниях. На сегодняшний день два наших электромагнитных 3D-сканера успешно использованы при проведении бурения в двух скважинах. Заказчики очень довольны результатом, готовы к дальнейшему сотрудничеству и ждут от нас новых геонавигационных приборов.

— На комбинате не планируют разработать собственную роторно-управляемую систему?

— Мы действительно работаем над этим. В 2026 году мы планируем опытно-промышленные испытания своей системы, ведутся переговоры с заказчиками о проведении таких работ.

— Надеюсь, ее выпуск станет поводом для еще одного разговора. Но сейчас расскажите, пожалуйста, подробнее про оборудование, установленное на испытательном участке.

— Пожалуй, самое уникальное оборудование — вертикальная термобарокамера с длиной рабочей камеры 7 м. Она, кстати, не имеет аналогов в России. В ней имитируется среда, в которой работают геонавигационные приборы на глубине в несколько тысяч метров — это температура 150 °С и давление 100 МПа. С каждым прибором проводятся термогидростатические испытания. Помимо этого, тестируем и отдельные узлы, если это предусматривает конструкторская документация. Проведение таких приемо-сдаточных испытаний гарантирует качество и надежность выпускаемого геонавигационного оборудования.

Установленный на участке гидропроливной стенд длиной 60 м имитирует скважинный поток буровой жидкости. С помощью его проводят испытания модуля пульсатора, который измеряет технологические параметры в процессе бурения, и модуля генератора, который вырабатывает энергию для питания электроники системы. На стенде мы как раз проверяем и тестируем эти возможности.

— В испытательном центре можно протестировать калибровку приборов с созданием идеальной границы геологического пласта. Расскажите, что это значит.

— Наше испытательное оборудование дает возможность выполнить такие метрологические настройки выпускаемых приборов, которые позволяют повысить точность проводки скважины по продуктивной части пласта и повысить информативность в процессе бурения.

— Есть еще вибростенд. Как он функционирует?

— Вибростенд имитирует скважинные вибрационные нагрузки на приборы. Он позволяет проверять надежность монтажа всех комплектующих. Например, электронных плат.

— А где изготовлены стенды, которые работают в центре испытаний?

— Изготовитель термобарокамеры — компания из Санкт-Петербурга, которая сделала ее по нашему техническому заданию. А проливной стенд и другое оборудование разработал и изготовил наш партнер — компания «Русские универсальные системы», монтаж и сборку оборудования проводили совместно.

— Какие экономические плюсы для «Электрохимприбора» появятся благодаря созданию испытательного центра?

— Нам не нужно больше отправлять наши геонавигационные приборы на испытания в сторонние организации, то есть это минус транспортные расходы и оплата за амортизацию испытательного оборудования. Огромный плюс — сокращение сроков изготовления. Полный комплекс испытаний повысит конкурентоспособность наших приборов, ведь для заказчиков в лице нефтегазовых компаний важна надежность прибора. Несколько наших приборов уже прошли испытания, и успешно.

— Сколько человек работает в центре испытаний и что это за персонал?

— Персонал центра — это испытатели деталей и приборов, всего пять человек. Сейчас мы выходим уже на серийный выпуск продукции, следовательно, объем работ возрастет. Но за счет концентрации всех стендов на одном участке мы можем обойтись теми сотрудниками, которые у нас сейчас есть. То есть оператор запустил термобарокамеру с одним прибором, второй прибор установил в проливном стенде, третий проходит метрологические калибровки по точности проводки. Концентрация расположения испытательного оборудования позволяет нам запараллелить процессы испытаний разной номенклатуры геонавигационных приборов. Это очень важно, так как никто не снимает с нас обязанности реализации других

### Роторно-управляемые системы (РУС)

Бурение скважин с горизонтальным окончанием началось в мире с середины XX века. Увеличение протяженности горизонтальных скважин имеет ряд сложностей. Одна из них связана с тем, что основная сила бурения — осевая нагрузка на бур — не доходит до забоя скважины из-за сил трения в сложном профиле скважины, и это делает невозможным дальнейшее бурение. Проблема была решена в США в конце 1990-х годов с созданием роторно-управляемых систем. Технология обеспечивает процесс направленного бурения одновременно с непрерывным вращением всей бурильной колонны, улучшая условия очистки и качества ствола скважины. Телеметрические и геонавигационные устройства, включенные в систему, позволяют управлять направлением бурения дистанционно. Роторно-управляемая система управляется оператором через компьютер. С помощью техники оператор формирует сигнал, который через буровой раствор или электромагнитное излучение доходит до забойного узла. Электронный блок управления и система отклоняющего механизма реагируют на него и изменяют направление бурения скважины. При этом встроенные телеметрические приборы постоянно мониторят текущие угловые параметры. Полученные данные через электронный блок телеметрии передаются на поверхность в устройство, принимающее и усиливающее сигнал. Последний после усиления поступает на компьютер и прибор визуального контроля.

До 2022 года все роторно-управляемые системы, применяемые в России, были произведены исключительно зарубежными компаниями. В том же году большая четверка крупных иностранных нефтесервисных компаний — Schlumberger, Halliburton, Baker Hughes, Weatherford — объявила о приостановке работы в России. Одним из востребованных направлений импортозамещения в топливно-энергетическом комплексе и в высокотехнологичном бурении стали именно РУС. В 2023 году несколько российских компаний провели испытания прототипов первых отечественных РУС и приступили к их серийному производству.

производственных задач, в том числе в выполнении государственного заказа.

— Можно ли в вашем центре испытывать геонавигационные приборы производства других предприятий?

— В центре может испытываться вся номенклатура используемых в стране геонавигационных приборов диаметром до 190 мм. Еще и поэтому центр так ценен для предприятия — это дает возможность привлечь дополнительные инвестиции. Так что мы ждем клиентов.

# Нестандартные стандарты

Какие задачи решают метрологи-атомщики



Александр Стелюк

Директор научно-исследовательского метрологического отделения Бочваровского института

Сейчас перед атомной отраслью ставятся новые задачи, происходит рост новых производств. Решение задач и открытие производств невозможно без измерений. Метрологическая служба Бочваровского института прошла подтверждение компетентности в национальной системе аккредитации по направлению «Метрологическая экспертиза и аттестация методик (методов) измерений» и прошла аккредитацию на право выполнения или оказания услуг по проведению испытаний стандартных образцов в целях утверждения типа. Подробнее о новациях в работе рассказал директор научно-исследовательского метрологического отделения Бочваровского института Александр Стелюк.

— Зачем потребовалась дополнительная аккредитация?

— В Федеральной службе по аккредитации (ФСА) поменялись схемы аккредитации: произошло их разделение на непересекающиеся процедуры. Раньше не запрещалось проходить одновременно аккредитацию на разные виды деятельности и, соответственно, иметь общий аттестат аккредитации. При плановых работах по подтверждению компетенций «выполнение работ по проведению испытаний стандартных образцов в целях утверждения типа» пришлось сократить как менее востребованную область деятельности отделения. Так и вышло, что, по сути, по направлению «Испытания стандартных образцов» мы аккредитовались заново.

— Что такое стандартные образцы в атомной отрасли? Почему они должны проходить специальные испытания?

— Стандартный образец (СО) — образец вещества (материала) с установленными по результатам испытаний значениями одной и более величин, характеризующих состав или свойство этого вещества (материала). Это своего рода эталон материала или изделия, он хранит и воспроизводит единицы величин с учетом особенностей изделий и процедур измерений. Чаще всего СО используется для контроля правильности, градуировок средств измерений и организации процедур контроля качества измерений, что является неотъемлемой частью методик (методов) измерений. Поскольку мы работаем в атомной отрасли, то набор измеряемых параметров для нас сильно отличается

от общей промышленности РФ. Это связано как с применением ядерных материалов с соответствующими лицензиями, так и с требованиями об особенностях измерений в области использования атомной энергии, установленными законодательством РФ.

Почему СО должны проходить испытания? Раньше была процедура аттестации, но регулятор перешел на термины «испытания» и «утверждение типа», по аналогии со средствами измерений. Поэтому процедура, при которой устанавливаются характеристики и приписываются к СО, называется испытаниями. Ранее под текущее определение СО попадали Государственные стандартные образцы (ГСО). Они имели наивысший приоритет и на законодательном уровне считаются эталоном, который принимается всеми государственными органами. ГСО утверждает национальным органом по стандартизации.

Способы установления характеристик СО могут быть разными, это и прямые измерения, и межлабораторные сличительные испытания, и т.п. Обеспечение отрасли стандартными образцами является одной из ключевых задач нашего отделения.

Например: стандартный образец массовой доли урана в закиси-оксида урана. Он зарегистрирован, внесен в Федеральный информационный фонд, у него есть описание типа со всеми установленными показателями. Он применяется в ряде методик (методов) измерения, в том числе и при контроле продукции.

Также особое внимание обращается сейчас на применение стандартных справочных данных. Стандартные справочные данные (ССД) — это справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов, утвержденные федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в области обеспечения единства измерений, и опубликованные в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений. Разработка и аттестация ССД в области использования атомной энергии — это отдельная и крайне объемная задача, связанная с дореакторными и послереакторными испытаниями. При проведении данных работ требуется привлечение широкого круга исполнителей. Также отдельно стоят вопросы о правах интеллектуальной собственности на результаты ССД.

ССД и СО создаются в том числе для конструктивных материалов. Но их нередко разрабатывают под нужды конкретного проекта, например реакторов

БРЕСТ или БН-1200. Постоянно появляются и новые материалы для оболочек ТВЭЛОВ.

— Зачем нужна строгая регламентация этих материалов и фиксация их свойств, если может потребоваться изменить отдельное свойство и придется заново ставить его на учет и проходить всю процедуру?

— Полный цикл испытаний каждый новый материал проходит в обязательном порядке. Его работоспособность проверяется во всех возможных заданных режимах, выясняется, как материал поведет себя в результате того или иного воздействия. И в любом случае все его характеристики должны быть зафиксированы, описаны и включены в соответствующие реестры, а также они должны ложиться в основу всех расчетов.

— Каждый модернизированный материал надо вводить в реестр?

— Ростехнадзор в своих нормах и правилах (НП) требует, чтобы материал был аттестован, а информация о каждом конструкционном материале и его характеристиках была внесена в Сводный перечень документов по стандартизации «Росатома». Это большая программа со значительным объемом характеристик, которые еще будут уточняться и добавляться.

Дополнительный импульс данным работам придает новая редакция федерального закона «Об обеспечении единства измерений» от 26.06.2008 № 102-ФЗ, вступившего в силу в марте 2025 года (в редакции от 08.08.2024). В соответствии с ним мы также должны руководствоваться стандартными справочными данными, то есть любая цифра, константа и т.п. из этого перечня должны быть аттестованы и внесены в соответствующий фонд. Эта история будет распространяться на все материалы, которыми мы занимаемся в институте. Это и быстрая тематика, и транспортные реакторы. Объем работ колоссальный.

— Новации затронут все метрологические службы, работающие в отрасли?

— Безусловно. Речь о стандартизации данных и дореакторных, и послереакторных испытаний, вопрос в консервативности обоснования безопасности при проектных и запроектных авариях. Пока мы аккумулируем данные, часть из них есть в стандартных справочных материалах, части пока нет. Потом встанет вопрос о правах собственности, ведь любые измерения материалов — это очень дорогостоящая работа, огромный набор воздействующих факторов (температуры, режимы), и раскрывать данные, полученные за счет предприятия, экономически не очень правильно.

— В минувшем году метрологическая служба института провела аттестацию 50 с лишним новых методик измерений. Каких именно?



— Наш институт, как главный научный метрологический центр госкорпорации «Росатом» и базовая организация метрологической службы Топливного дивизиона по направлению аттестации методик (методов) измерений, имеет широкий круг компетенций в части разработки и аттестации методик. Поэтому мы активно привлекаемся к работам по метрологическому обеспечению производств и решению новых измерительных задач. Это связано в том числе и с разработкой и аттестацией новых методик (методов) измерений. Это и контроль, и измерения различных параметров таблеток ядерного топлива, ТВЭЛОВ и ТВС, и учетные измерения. Обеспечение технологического процесса также входит в круг наших задач. Как примеры измеряемых параметров можно упомянуть насыпную плотность порошка или плотность топливной таблетки. Также контролируется состав порошка и его химические свойства. Учитывается и поверхностная загрязненность твэла перед сборкой. Есть и другие методики контроля — отходов при производстве, отложений ЯМ, которые образуются в трубопроводах, трубах вентиляции. Это множество параметров, которые в конечном счете влияют на работоспособность реакторного топлива, безопасность производства, а значит, и на общую безопасность. Как правило, проекты методик (методов) измерений разрабатываются на предприятиях, мы в Бочваровском институте участвуем в их доработке и приведении их к соответствию с требованиями федерального законодательства, ГОСТов.

— Еще одно важное направление работы метрологов Бочваровского института — проведение межлабораторных сличительных испытаний (МСИ). Как часто они проводятся?

— Согласно ГОСТу ISO/IEC 17043-2013 термин «межлабораторные сличения» означает организацию,

выполнение и оценку измерений или испытаний одного и того же или нескольких подобных образцов двумя или более лабораториями в соответствии с заранее установленными условиями. Несколько упрощенно, это означает, что провайдер организует рассылку зашифрованных образцов, лаборатории проводят измерения образцов и предоставляют результаты провайдеру, провайдер проводит оценку полученных результатов и делает соответствующие выводы. Участие в МСИ для лабораторий также является одним из обязательных условий при подтверждении их компетенций. В целом в стране есть определенное количество провайдеров МСИ. Однако, с учетом специфики атомной отрасли, Бочваровский институт является единственным аккредитованным провайдером МСИ среди организаций, входящих в госкорпорацию «Росатом». «Росатом», осознавая важность и необходимость проведения МСИ в отрасли, совместно с нами организует на плановой основе программы по подтверждению квалификации лабораторий, решая следующие задачи:

- подтверждение компетентности лабораторий;
- выявление проблем в лабораториях и инициирование корректирующих действий;
- получение представлений о проблемах при измерениях в отрасли;
- создание востребованных СО;
- обеспечение дополнительного доверия у заказчиков лаборатории;
- получение дополнительной возможности проведения аттестации методик (методов) измерений.

— Приходилось слышать, что отечественные и зарубежные методики (методы) измерений

во многом не совпадают. Насколько это критично для российской атомной отрасли?

— У нас сильно отличаются подходы и регламенты при оценке метрологических характеристик. Если у РФ это отдельный аккредитуемый вид деятельности, то за рубежом, как правило, оценка неопределенностей возложена на саму лабораторию, то есть по факту лаборатория сама декларирует неопределенность полученного результата измерений. В РФ аттестация — это независимый и регламентированный процесс. Отсюда и возникают разногласия при применении иностранных методик. Формально у нас все методики должны быть аттестованы и результаты аттестации внесены в соответствующий Федеральный информационный фонд (ФИФ). Однако до сих пор существует целый пласт методик, регламентированных старыми стандартами (это ГОСТы, ОСТы и т.п.), которые не соответствуют современным требованиям. При этом, если внимательно читать критерии аккредитации для испытательных лабораторий, то мы не увидим требования про аттестацию и внесение в ФИФ, но есть требования, что лаборатории должны самостоятельно уметь определять бюджет неопределенности. Данный казус носит законодательный характер. Исходя из перечисленного видно, что наше расхождение с зарубежным подходом в большей степени касается процедур и порядка оценивания метрологических характеристик. В соответствии с особенностями обеспечения единства измерений в области использования атомной энергии, изложенными в приказе госкорпорации «Росатом» от 31 октября 2013 года № 1/10-НПА, четко указано, что все методики (методы) измерений в нашей отрасли должны быть аттестованы. Поэтому, даже применяя зарубежные стандарты, такие как ASTM и ASME, мы все равно вынуждены разрабатывать внутренние стандарты «Росатома» и проводить их аттестацию.

— В сентябре прекращается действие многих отраслевых стандартов. Что будет дальше? Каким образом вы планируете налаживать работу?

— В целом это тоже важная тема. Формально скоро применяемые отраслевые стандарты прекратят свое действие, что затрагивает огромный пласт продукции. В целом по части документов ведется работа по пересмотру в плановом порядке, существуют программы по стандартизации как уровня госкорпорации «Росатом», так и дивизионального уровня. На данном этапе завершен процесс сбора и анализа информации от организаций отрасли по всем применяемым отраслевым стандартам. Часть из указанных документов перевыпущена в рамках действующих документов по стандартизации (это и СТО 95..., СТО, ОИ и т.п.). Часть документов, которые не успели пересмотреть в плановом порядке, будут с минимальными изменениями выпущены в ранге стандартов организаций, с плановым пересмотром в дальнейшем. Комплекс работ, проводимых по данному вопросу в госкорпорации «Росатом» и в дивизионах, позволяет надеяться, что данный вопрос мы успешно решим.



Текст: Евгения Лобзина  
Фото: концерн «Росэнергоатом»

## Чей цех лучше всех?

Рассказываем, почему начальник цеха — это ключевая фигура на АЭС и в чем секрет успеха лучших начальников цехов



**Конкурс на лучшего начальника цеха АЭС и дочерних организаций — ежегодная практика концерна «Росэнергоатом» по определению руководителей лучших производственных подразделений. Проект предоставляет уникальную возможность заявить о себе не только на уровне дивизиона, но и всей отрасли. В этом году конкурс прошел уже в четвертый раз, собрав рекордное количество заявок — 140 от представителей 11 атомных станций и 2 дочерних организаций. А 14 мая по традиции в финале в Москве встретились 5 лучших участников, чтобы побороться за статус сильнейшего.**

### В руках мастера

Почему конкурс посвящен именно этой категории персонала? Начальники цехов находятся на передовой работы атомной станции, решают важнейшие производственные задачи, совершенствуют организацию производства, механизацию и автоматизацию

технологических процессов, предупреждают возникновение возможных нарушений в работе оборудования. В их руках — эффективность и качество работы производства, а их подчиненные регулярно побеждают на чемпионатах профессионального мастерства отраслевого и национального уровней.

«Надежность и безопасность атомной энергетики начинается с людей — с их профессионализма, ответственности и умения работать в команде. Именно начальники цехов ежедневно держат на своих плечах основную производственную нагрузку. А те, кто вышел в финал конкурса, уже доказали: они — лучшие. Такие лидеры — инициативные, вовлеченные, неравнодушные — двигают наш дивизион вперед», — отметил генеральный директор концерна «Росэнергоатом» Александр Шутиков.

В этом году конкурс стартовал еще 31 января и прошел в несколько этапов на предприятиях. По их итогу на дивизиональном уровне были определены пять лучших участников, которые должны были пройти очную защиту в финале конкурса. Руководители под председательством генерального директора концерна «Росэнергоатом» оценивают конкурсантов по целому

ряду критериев, в числе которых производственные достижения, лидерские качества, вовлеченность персонала, а также вклад в развитие культуры безопасности и реализацию проектных инициатив. По признанию членов жюри, распределение призовых мест оказалось непростым: разрыв в итоговых баллах был минимальным. Финалисты получили из рук генерального директора концерна «Росэнергоатом» почетные грамоты и денежные премии.

### Цех — это про людей

Победитель конкурса Александр Задорожнюк всю свою трудовую деятельность — более 28 лет — посвятил цеху вентиляции Ростовской АЭС. Это одна из самых южных атомных станций в России, и именно здесь обеспечение температурного режима в летний максимум — ключевая задача, с которой его подразделение успешно справляется.

«Цех — это как слаженная команда, где каждый на своем месте и каждый важен. Если кто-то сталкивается с трудностью — это сразу чувствует вся система. Поэтому я стараюсь быть руководителем, к которому можно прийти, поговорить, посоветоваться. У нас нет второстепенных людей или задач. Все, что мы делаем, — вклад в общее дело. Именно в этом, я считаю, и есть настоящая сила коллектива», — подчеркнул Александр Задорожнюк.

### В пространстве достижений

Александр Задорожнюк рассказывает, что прошлый год оказался очень результативным для его подразделения: «Реализовано 11 технических решений, включая модернизацию оборудования для продления ресурса первого энергоблока. Досрочная реализация позволила сэкономить только на закупке

оборудования более 678 млн рублей. Также мы внедрили новую схему химической промывки воздухоохладителей с элементами гидродинамической кавитации. Технологию впервые применили на всех энергоблоках, что позволило сократить сроки ремонта оборудования в период ППР и повысить качество очистки. Сегодня она используется и в других цехах станции. 1 марта 2024 года начал работу созданный по моей инициативе цех по ремонту вентиляции и кондиционирования (ЦРВиК) в составе «Атомэнергоремонта». Новый коллектив из 105 специалистов полностью охватывает работы по техническому обслуживанию, ремонту и модернизации оборудования цеха».

На примере результатов работы химического цеха Калининской АЭС (начальник цеха — Алексей Цицер) видно, как они влияют на общую эффективность и инновационность станции. Благодаря работе цеха все энергоблоки переведены на современный аммиачно-этанолламинный водно-химический режим второго контура, что положительно сказывается на ресурсе и коррозионном состоянии оборудования.

В последние два года химическим цехом Калининской АЭС в рамках реализации программы импортозамещения концерна «Росэнергоатом» реализованы программа опытно-промышленных испытаний хроматографических колонок для анализа неорганических анионов производства ООО «НПО ЕВРОХИМ» и программа замены импортных ионообменных смол на ионообменные смолы отечественного производства — компании ПО «ТОКЕМ». Также проведены масштабные исследования огнестойкой жидкости, постоянно ведутся работы по модернизации систем и оборудования.

Для начальника цеха по обращению с радиоактивными отходами Балаковской АЭС Романа Колдомасова 2024 год был непростым, но вместе с тем он стал настоящим прорывом. «Мы реализовали сразу два государственных контракта: вывезли шесть парогенераторов на переработку — это уникальная операция, которую раньше в отрасли никто не делал, и переработали 100 м<sup>3</sup> РАО в сжатые сроки. Параллельно шла модернизация всех направлений — от спецпрачечной до участков дезактивации. Все без срывов, с высоким качеством и хорошим результатом», — поделился Роман Колдомасов. Успешная реализация пилотного проекта по извлечению с мест хранения, транспортировке и утилизации крупногабаритных ТРО привела к существенному снижению количества имеющихся радиоактивных отходов и увеличению до 40% свободного объема хранилищ отработавших парогенераторов Балаковской АЭС. А выбор водного транспорта позволил полностью исключить радиационное воздействие на население в случае использования наземных видов транспорта. Избранная технология переработки РАО обеспечит возможность повторного использования незагрязненного металлического лома (не менее 60% от массы каждого парогенератора в промышленном производстве). В атомной отрасли

такая операция с крупногабаритными радиоактивными отходами проводилась впервые.

Михаил Ким руководит турбинным цехом №3 Белоярской АЭС. За отчетный период под его руководством реализовано пять технических решений, направленных на повышение безопасности и удобства эксплуатации. Среди них — импортозамещение торцевых уплотнений (расходник) питательных насосов, применение стробоскопа для визуального контроля бойков регулятора безопасности турбины, а также скрытие травмоопасных элементов под защитными накладками. Восемь практик по итогам года оформлены как положительные.

«Считаю, что достижения отдела не могут идти отдельно от достижений всего предприятия, от задачи безопасной и эффективной выработки электроэнергии. Недавно мы проводили большую работу по переводу инновационных энергоблоков с ВВЭР-1200 на 18-месячный топливный цикл. Принимая участие во внедрении новых типов ядерного топлива. Сейчас работаем над вывозом отработавшего ядерного топлива с энергоблоков нового поколения», — поделился начальник отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежской АЭС Евгений Голубев. Интересно отметить, что Евгений Голубев — потомственный атомщик. Его дед, лауреат Ленинской премии, руководитель научно-исследовательского отдела НВАЭС Лев Голубев, стал одним из прототипов героев памятника «Покорителям атома», посвященного первым ученым, заложившим научную основу безопасной работы энергоблоков с ВВЭР. Памятник был открыт в Нововоронеже в 2024 году, в преддверии 60-летия НВАЭС.

### Единой командой

В цехе Александра Задорожнюка на Ростовской АЭС работают 83 сотрудника. «Принципиально важный для меня момент — психологическая совместимость работников внутри коллектива. Мне известны сильные и слабые стороны каждого человека, знаю психологический портрет каждого. Кто-то может брать на себя инициативу и решать прорывные задачи, кто-то — методично и спокойно работать с базами данных и проектами. Важно, чтобы внутри коллектива было чувство плеча, доверие, открытость и понимание. У нас много молодежи, и есть сильная основа из давно работающих сотрудников, на которых можно опереться. Их слаженная взаимная работа позволяет активно передавать накопленный опыт и развиваться. Для меня настоящий лидер — тот человек, который всегда идет впереди, за которым осознанно движется весь коллектив, и тот, кто не боится брать на себя всю полноту ответственности за принятые решения», — объясняет Александр Задорожнюк.

Начальник цеха по обращению с радиоактивными отходами Балаковской АЭС Роман Колдомасов поделился своим рецептом работы с персоналом: «Самое ценное — это люди. Я люблю свою работу, у нас сплоченный коллектив, интересные и разнообразные задачи,

поэтому я получаю удовольствие от рабочего процесса. Наш цех отвечает за дезактивацию оборудования и помещений в зоне контролируемого доступа, обращение с радиоактивными и промышленными отходами, обеспечение санитарно-пропускного режима, спецпрачечную, салон спецодежды, обращение по учету и контролю радиоактивных веществ и радиоактивных отходов. В моем цехе работают 59 человек, и у каждого — своя зона ответственности. Но по-настоящему результат достигается только в команде. Я всегда говорил: если на одном участке возникает отставание, подтягивается и помогает весь цех. Для решения поставленных задач необходима единая слаженная команда. Требование для всех руководителей и персонала: есть результат — ты в команде, нет результата — расстанемся. Всех своих подчиненных я знаю в лицо. Поэтому главную задачу мы видим в создании уникального коллектива. Люди, которые разделяют единые ценности, чувствуют себя одной командой и работают на достижение общего результата, — вот наше главное богатство и ресурс. Такие люди не подведут».

Один из самых больших цехов на атомной станции — химический. Например, на Калининской АЭС в нем работают более 300 человек. Для его руководителя Алексея Цицера идеальная работа цеха определяется именно людьми, когда все работники чувствуют и воспринимают себя одной большой дружной и крепкой семьей, безопасно и качественно выполняющей одну общую задачу. «Химический цех — сплоченный коллектив, где у каждого есть возможность раскрыть свой потенциал. Здесь сохраняется преемственность поколений и создаются условия для обмена опытом», — комментирует Алексей Цицер.

С ним соглашается начальник отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежской АЭС Евгений Голубев: «Идеальная работа подразделения — работа единой командой как внутри, так и с другими подразделениями атомной станции. Когда каждый в команде готов сделать хоть немного больше, чем от него требуется, — это одна из составляющих успеха. Мы постоянно работаем над развитием сотрудников, особенно молодых. Четкое выполнение обязанностей, дисциплина, критический подход к своей работе, понимание собственного вклада в безопасность — мои ожидания от сотрудников отдела. Чтобы отдел работал хорошо, его руководство должно постоянно над этим трудиться».

Михаил Ким, начальник турбинного цеха №3 Белоярской АЭС, считает, что безопасную, надежную генерацию обеспечивает только сплоченная и мотивированная команда. Сам он пришел в отрасль 21 год назад, начинал машинистом-обходчиком, а сегодня руководит цехом, в зоне ответственности которого — работа турбинного оборудования на четвертом энергоблоке с БН-800. Отдельный блок работы — развитие персонала. В цехе создана система наставничества: каждый из 12 новых сотрудников закреплен за опытным наставником. Оперативный персонал движется по карьерной лестнице и готовится к участию в проектах на будущих энергоблоках.

## Коротко

### Кто стал лучшим начальником цеха АЭС в этом году

- 1-е место: **Александр Задорожнюк**, начальник цеха вентиляции Ростовской атомной станции.
- 2-е место: **Алексей Цицер**, начальник химического цеха Калининской атомной станции.
- 3-е место: **Роман Колдомасов**, начальник цеха по обращению с радиоактивными отходами Балаковской атомной станции.
- 4–5-е места: **Михаил Ким**, начальник турбинного цеха №3 Белоярской атомной станции, и **Евгений Голубев**, начальник отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежской атомной станции.

### Александр Задорожнюк

— Свою трудовую деятельность на Ростовской АЭС начал еще 28 лет назад, слесарем по ремонту, сразу после окончания института. Прошел путь до заместителя начальника цеха, и в декабре 2020 года меня назначили начальником цеха вентиляции.

С момента назначения сразу поставил себе амбициозную цель — сделать цех вентиляции Ростовской АЭС лучшим цехом вентиляции среди российских атомных станций. Поэтому участие в конкурсе стало для меня одним из этапов выполнения этой задачи. Кстати, в конкурсе такого масштаба принимал участие впервые.

Наш цех отвечает за температурный режим, воздухообмен и радиационную безопасность в части газоаэрозольных выбросов четырех энергоблоков и общестанционных объектов. Эксплуатация, техническое обслуживание, ремонт и модернизация — три основных направления нашей деятельности, как три неразделимых звена одной цепи. Мы их рассматриваем как содружество родов войск: только их совместное активное развитие и продвижение дает синергию процесса и максимальный позитивный эффект на выходе.

Я всегда говорю: у нас нет второстепенных задач, и все проблемные вопросы должны лежать на поверхности. Спрятанный вопрос — потенциальная угроза безопасности. Если где-то сбой, это чувствуется вся система. Поэтому стараюсь быть руководителем, к которому можно прийти с любой проблемой. Дверь в мой кабинет всегда открыта для всего персонала. Победа в конкурсе для меня не просто личное достижение. Это сигнал всей моей команде: мы на правильном пути, и наш труд видят и ценят. Это еще один очень важный шаг к нашей амбициозной цели — сделать цех вентиляции Ростовской АЭС лучшим цехом вентиляции среди российских атомных станций!



### Алексей Цицер

— На Калининской АЭС я начинал оператором спецводоочистки химического цеха. С 1998 года прошел все ступени профессионального и карьерного роста. Дошел до заместителя начальника цеха — начальника водно-химической лаборатории, а с 2017 года по настоящее время — начальник химического цеха. За это время выполнял разноплановую работу: от эксплуатации и курирования стройки и монтажа до лабораторных изысканий.

К участию в конкурсе подтолкнуло желание показать, что наш коллектив добивается значительных результатов в работе. Ведь я — представитель большого коллектива цеха. В конкурсе принимаю участие второй раз, два года назад также занял второе место.

В ведении цеха десятки систем, объектов, лабораторий. Наши основные задачи — выработка химически обессоленной воды, хранение и выдача реагентов, всесторонний контроль и поддержание в нормируемых пределах водно-химических режимов основных и вспомогательных контуров АЭС, обращение с жидкими радиоактивными отходами, переработка и захоронение промышленных стоков.

### Роман Колдомасов

— На Балаковской АЭС и в цехе я работаю 28 лет. В 1996 году услышал о наборе на атомную станцию, написал заявление, и вот я здесь. О том, что буду начальником цеха, когда устроился на работу, конечно, не думал. Начиная с переработчика РАО, мастера, затем стал заместителем начальника цеха и в 2015 году был назначен начальником цеха.

Считаю, что руководитель должен быть в гуще процессов. Видеть, как работает цех, знать, кто из сотрудников на что способен, вовремя поддержать, подсказать. У нас сейчас много молодежи, и мы с первых



**Александр Задорожнюк**

Начальник цеха вентиляции Ростовской атомной станции



**Алексей Цицер**

Начальник химического цеха Калининской атомной станции



**Роман Колдомасов**

Начальник цеха по обращению с радиоактивными отходами Балаковской атомной станции



**Михаил Ким**

Начальник турбинного цеха №3 Белоярской АЭС



**Евгений Голубев**

Начальник отдела ядерной безопасности и надежности Нововоронежской атомной станции

дней включаем их в работу. Наставничество у нас не формальность, а часть культуры. Каждый понимает, зачем он пришел и какой результат должен дать. И это, пожалуй, главное.

Руководитель я требовательный. Стараюсь проявлять гибкость и способность одновременно решать несколько проблем, быть образцом во всем для своих подчиненных. Для меня начальник цеха — это личная ответственность, защита интересов коллектива, умение планировать, четко ставить перед собой задачи, грамотно распределять роли и делегировать полномочия.

У меня много увлечений: читать хорошую книгу, погружаясь в захватывающую историю на ее страницах, ходить на рыбалку, разгадывать кроссворды. Люблю совершать долгие прогулки на природе, вдыхая свежий воздух и наслаждаясь красотой окружающего мира. Все эти занятия помогают мне сохранить позитивный настрой и спокойствие. А поддержка родных вдохновляет на новые свершения и помогает решать сложные задачи.

### Михаил Ким

— Турбинный цех №3 — это блок №4 Белоярской АЭС. Мы отвечаем за безопасную и надежную выработку электрической и тепловой энергии, а значит, за стабильность и надежность всего процесса. В коллективе 84 человека. За последние годы мы собрали сильное, сплоченное подразделение. Люди приходят, вовлекаются, развиваются и становятся единой командой. Это показатель.

Я всегда верил в то, что культура безопасности и порядок начинаются с повседневных мелочей. В 2024 году мы реализовали целый комплекс улучшений: усилили визуализацию параметров, импортозаместили торцевые уплотнения питательных насосов, оптимизировали техпроцессы.

В этом году мы также запустили проект по охране труда с уполномоченными в каждой вахте. Это не формальность: люди проводят противопоаварийные трени-

ровки, анализируют реальные инциденты, предлагают решения. Я верю в такую вовлеченность. И, являясь руководителем, стараюсь быть рядом — как человек, с которым можно поговорить, посоветоваться, найти решение вместе.

### Евгений Голубев

— На Нововоронежскую АЭС я попал после окончания физического факультета Воронежского государственного университета. Удачно сложилось, что сразу начал работать по специальности — инженером-физиком в теплофизической лаборатории, которая в дальнейшем преобразовалась в отдел ядерной безопасности. Поэтому в отделе, который я сейчас возглавляю, я работаю с самого начала. Уже опытным инженером был зачислен в кадровую программу «Таланты Росатома» и после ее завершения стал заместителем начальника отдела по сооружаемым блокам. Ввод в эксплуатацию энергоблоков №6 и 7 Нововоронежской АЭС стал для меня уникальной возможностью вырасти над собой и получить управленческий опыт, необходимый для назначения на должность начальника подразделения атомной станции.

Отдел ядерной безопасности и надежности объединяет ряд направлений, связанных с ядерным топливом и безопасностью атомной станции. Это инженерная поддержка при управлении активной зоной, оценка состояния физических барьеров, учет и контроль ядерных материалов, надежность ядерного топлива, контроль ядерной безопасности, вероятностный анализ безопасности (ВАБ). Поэтому в отделе работает порядка 70 человек.

Я всегда стараюсь не останавливаться на достигнутом. Производственные конкурсы — один из аспектов, который помогает в развитии и сотрудника, и руководителя. Именно поэтому мы впервые в концерне «Росэнергоатом» подготовили и провели на Нововоронежской АЭС конкурсы инженеров-физиков и инженеров-спектрометристов. В конкурсе руководителей участвую не первый раз, но в финал удалось выйти только в этом году.

# Звезды из университетов

Как и зачем в региональных научных центрах нужно выращивать популяризаторов науки



**В каждом из стратегических государственных документов последнего десятилетия, посвященных развитию науки и технологий, обязательно есть целый раздел о важности популяризации региональной науки. О том, как Информационные центры по атомной энергии уже более 10 лет решают эту задачу, мы поговорили как с сотрудниками сети, так и с учеными-популяризаторами — участниками проекта ИЦАЭ «Энергия науки».**

## В поисках новых лиц

На сцене за столом в свете софитов сидят четверо. Ведущий читает подборку новостей, а трое гостей комментируют их, отпуская шутки. Можно было бы подумать, что присутствуешь на записи очередного выпуска популярного телешоу. Но нет. Дело происходит в одном из Информационных центров по атомной энергии. На сцене — не профессиональные комики, а молодые ученые, вчерашние аспиранты из разных городов. Ни у кого из них нет опыта выступления в студенческом КВН. И тем не менее зал набит под завязку и хохочет над каждой репликой.

Все они — участники проекта ИЦАЭ «Энергия науки». Это программа продвижения региональных ученых, задача которой — знакомить жителей регионов

с новейшими научными открытиями и передовыми технологическими разработками и параллельно формировать межрегиональное экспертное сообщество на базе сети ИЦАЭ.

Проект «Энергия науки» появился более 10 лет назад. Точнее дату уже никто и не вспомнит. «Отправной точкой стало простое соображение, которое актуально и сегодня, — рассказывает программный директор ИЦАЭ Никита Перфильев. — У нас есть растущая сеть просветительских площадок по всей стране. Даже сегодня трудно будет найти такое количество уже состоявшихся публичных ученых и популяризаторов науки, чтобы закрыть годовую программу мероприятий. Вполне логично, что мы обратили свой взгляд на региональные научные центры как источник новых лиц "научпросвета"».

По словам Никиты Перфильева, за это время проект трансформировался: «Вместе с базой спикеров росло количество и разнообразие форматов. В нашем арсенале помимо классических лекций теперь различные ток-шоу, к участию в которых мы активно привлекаем и спикеров, которых возим по стране в рамках "Энергии науки"».

Сегодня этот проект стал важнейшей составляющей экосистемы по рекрутингу молодых ученых из числа перспективных специалистов — представителей региональных научных центров и их выращиванию в экспертов-просветителей федерального уровня, которую выстраивает ИЦАЭ. «Мы стартуем на уровне региона с форматом ИЦАЭ Ореп, то есть регулярных лекций и мастер-классов. После этого, когда спикер зарабатывает имя здесь, уже через «Энергию науки» мы выводим его на межрегиональный уровень, даем возможность приехать со своей лекцией в другие города, пообщаться со СМИ в других точках присутствия ИЦАЭ. Таким образом, спикеры наращивают свою базу фанатов, увеличивают свою популярность, превращаются в новых "рок-звезд", — говорит Никита Перфильев.

По состоянию на 2025 год в базе региональных спикеров — свыше 1000 имен. Только в минувшем году в рамках проекта в центрах ИЦАЭ по всей стране прошло свыше 110 мероприятий с участием более 70 ученых.

## Бывает ли наука региональной?

В том, что популяризация региональной науки, — дело благое, сомневаться не приходится. Но вот ответ на вопрос «Зачем это делать?» не так очевиден.



**Арсений Галимов**

Инженер лаборатории филогенетики и биохронологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН

Начнем с того, что сам термин «региональная наука» мало кому нравится: наука как явление едина, и существует масса примеров, когда прорывные исследовательские школы формировались далеко за пределами столиц. Кроме того, еще и в русском языке слово «региональный» часто синонимично словам «провинциальный», «вторичный», если не «второсортный».

Инженер лаборатории филогенетики и биохронологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН Арсений Галимов тоже не в восторге от определения. Кроме всего вышесказанного, сейчас новые технологии обмена информацией делают это понятие еще более условным. «Хотя тяжело не согласиться, что есть области знания, привязанные именно к региональной проблематике. Например, я занимаюсь историей растительности Урала и Западной Сибири. Понятно, что заниматься этим профессионально можно только в этом регионе», — полагает он.

Арсению Галимову вторит Никита Перфильев, который согласен с тезисом, что наука не бывает ни региональной, ни столичной. И тем не менее, убежден Никита Перфильев, региональный аспект в науке все же присутствует: «Крупные научные центры есть, конечно, не только в Москве и Санкт-Петербурге. Важно другое: возможностей для того, чтобы про них услышали, чтобы о них узнало как можно больше людей, у ученых из регионов сильно меньше».

Химик-разработчик, научный сотрудник Университета ИТМО Денис Байгозин видит эту проблему через свою «оптику»: «Я, кроме всего прочего, готовлю олимпиадников и в целом хорошо вижу, что происходит. А тенденция, честно говоря, пугающая. Еще 15 лет назад здесь, в Санкт-Петербурге, мы этого не чувствовали, а сегодня можно уверенно констатировать — все перспективные ребята перебираются в Москву. Кто-то скажет, что СПбГУ грех жаловаться на нехватку студентов. Формально это так. Но при внимательном рассмотрении становится понятно, что все это учащиеся из регионов, которые по ЕГЭ просто не дотянули до Москвы. Что же говорить про вузы из других регионов».

В этом смысле популяризация региональной науки, по мнению Дениса Байгозина, это, прежде всего, продвижение региональных научных центров и отдельных ученых, работающих там. «Задача — показать, что и на уровне регионов есть «места силы», через которые как минимум можно войти в большую науку. А, по большому счету, и делать вполне себе хорошую научную карьеру, — утверждает он. — С моей точки зрения, в этом есть очень важный смысл: если мы не создадим на местах преподавательские кадры (в школах ли, в вузах ли), то новые сами не нарождаются».



**Денис Байгозин**

Химик-разработчик, научный сотрудник Университета ИТМО

И через шаг мы столкнемся с колоссальной проблемой уже в масштабах всей страны».

## Я б в популяризацию пошел...

Популяризация сегодня — это модно, в этом убеждена руководитель ИЦАЭ Челябинска Лариса Матвеева. Поэтому и среди новых просветителей так много молодых людей. Хотя мотивы заниматься просветительством практически у каждого из них разные. «Есть те, кто идет в эту сферу, чтобы научиться говорить и представлять результаты своей работы просто и ярко. Есть те, кому просто интересно разбираться и рассказывать о смежных, а иногда и не очень смежных темах. Не стоит забывать и о формальной стороне вопроса. В вузах, а именно с их сотрудниками мы чаще всего имеем дело, есть отдельный КПЭ по общественной или воспитательной работе, который они выполняют, принимая участие в просветительских мероприятиях. Недавно наши большие друзья — молодые доценты-химики из ЧелГУ — попросили выдать им справку, что они являются нашими экспертами, проводят научно-популярные лекции, мастер-классы».

Еще на одну причину указывает Арсений Галимов: «Цифровые реалии диктуют новые правила. Быть популярным полезно, и сегодня для этого есть удобная метрика — место, которое его имя занимает в поисковой выдаче. Чем оно выше, тем охотнее к тебе идут волонтеры, легче получать гранты. Участие в просвет-проектах, таких как «Энергия науки», — хороший способ стать более заметным как для общестественности, так и для алгоритмов поисковых машин».

«Я скажу честно: у меня есть на «Яндекс.Картах» отметки, где я побывал. И каждый раз, когда я помечаю новый город, то получаю удовольствие, — смеется Денис Байгозин. — А если серьезно, то моя задача — «делать» больше химиков. В Питере читать публичные лекции не очень интересно, потому что я эту аудиторию уже знаю. Поэтому для меня важный мотив посещения новых регионов — поиск новой аудитории».

«Поиск абитуриентов — безусловно, важная задача», — соглашается Арсений Галимов. Впрочем, бывают и сугубо утилитарные истории. «Например, нам нужно было найти как можно больше человек, которые выставят предметное стекло в определенное время на определенной высоте для проведения эксперимента. И мы нашли 10 человек среди посетителей научно-популярных лекций», — говорит он.

Еще один аргумент «за» — это, как ни странно, информационный обмен между самими учеными. Арсений Галимов рассказывает, что именно благодаря «Энергии науки» он познакомился с известным судмедэкспертом Алексеем Решетуном: «Сфера моих научных интересов — палинология — наука на стыке



ботаники, геологии, палеогеографии, палеоботаники, связанная с изучением пыльцевых зерен и спор растений, грибов. В криминалистике палинология активно применяется, разработаны целые подходы. Но в российской криминалистике они практически не используются. Мне эта тема всегда была интересна. Оказалось, что и Алексей хорошо в нее погружен, даже рецензировал книжку судебного палинолога из Великобритании. Надеюсь, у нас получится что-то совместно сделать, хотя до встречи с Алексеем мне эта задача вообще казалась неподъемной».

«Наконец, — продолжает Арсений Галимов, — каждый ученый рано или поздно спрашивает себя: а зачем вообще все это? Например, я занимаюсь развитием экосистем, и нередко приходится отвечать себе на вопрос: а, в сущности, не все ли равно, как это все происходит? Я много думал над этим вопросом, когда пытался объяснить себе, почему мне после конференции или лекции так хочется работать. Ответ, кажется, в том, что ты находишься среди людей, которым интересно то же, что и тебе. Это то, что я называю мягким терапевтическим эффектом публичных выступлений», — говорит он.

У Натальи Вальтер, руководителя ИЦАЭ Воронежа, есть объяснение того, как этот эффект работает. «Мы имеем дело с самородками, которых сначала нужно выкопать из бюрократических наслоений

стандартного регионального вуза, а потом еще и убедить, зачем им приходиться и читать лекцию посторонним людям. И неизвестно, что сложнее, — рассказывает Наталья Вальтер. — Один из наших спикеров — достаточно известный в узких кругах миколог. Он сам по себе человек очень скромный, интроверт, занимающийся, с его точки зрения, крайне специальной малопопулярной темой, про которую и в вузе-то не с каждым поговоришь. Огромных трудов стоило уговорить его провести первую лекцию у нас в ИЦАЭ. Мы начали с аудитории в 15 человек, из которых добрая половина была его студенты. Сегодня — это вполне состоявшаяся звезда «научпросвета». Не стадионы, конечно, но свои 150 человек на лекцию о грибах он собирает стабильно. Оказалось, что и тема — хайповая и он сам — невероятный рассказчик. Когда этот первый барьер преодолен, спикер уже прикоснулся к этой магии публичности, он охотно поедет и в другой город и участвовать будет во всем, в чем попросишь».

По мнению Натальи Вальтер, сложно спорить с тем, что участие в таких популяризаторских проектах, как «Энергия науки», помогает ученым развивать навыки публичных выступлений и другие soft skills. Но все же, убеждена она, самое главное, что происходит с ними на сцене, — они заново влюбляются в свою сферу деятельности и, видя десятки пар заинтересованных глаз, убеждаются, что она нужна и интересна не только им.

Существует представление о современной популяризации как о чем-то не слишком серьезном, относящемся больше к индустрии развлечений (инфотейнменту), чем к науке. Ну и действительно, где настоящий, взрослый интеллектуальный поиск, а где мастер-классы со школьниками

или шоу про мемы с котом Шредингера? Хотя, возможно, это сегодня и делает такие проекты, как «Энергия науки», важной частью всей экосистемы в области научных исследований. Как газопылевые облака во Вселенной, где рождаются новые звезды.



Текст: Федор Буйновский, обозреватель «Вестника атомпрома»  
Иллюстрация: Midjourney

## Темная сторона власти

«Неореакция»: новые технологические элиты предлагают новое видение будущего

**Публичная ссора Илона Маска и Дональда Трампа всколыхнула в обществе новую волну интереса к американским элитам. В том числе появилось много материалов о популярном в этих кругах философском мировоззрении, которое стало мейнстримом среди политиков, пришедших к власти в США. Вдохновителем новой философии стал блогер Кертис Ярвин.**

«Темное просвещение» (Неореакционное движение, «Неореакция» или NRx) — это философское и политическое движение, построенное на отрицании просвещенческих идей либерализма и демократии, вместо которых предлагается проект авторитарного технологического капитализма.

Основателем этой системы является Ник Ланд (встречается также написание «Лэнд» и «Ленд»), английский философ, писатель и блогер. С 1987 по 1998 год он преподавал континентальную философию в Уорикском университете. Там вместе с женой Сэди Плант, известной в кругах киберфеминисток писательницей, в 1995 году он основал общество Cybernetic Culture Research Unit (CCRU, Кибернетический культурный исследовательский центр).

Впоследствии Плант покинула CCRU, который возглавил Ланд. На базе центра он занимался изысканиями в таких сферах, как оккультизм, рейв-культура, научная фантастика, а также изучал философию постструктурализма на основе работ Мишеля Фуко и Жака Деррида. Постструктуралисты считают, что знание не может иметь своим фундаментом ни опыт, ни какие-либо определенные «фундаментальные» истины, и выступают за свободу от самого основания знания. Постструктурализм послужил философской основой постмодернизма.

В 2012 году Ланд опубликовал сетевой манифест «Темное просвещение». В нем Ланд осуждает демократию и цитирует сооснователя PayPal и сторонника Дональда Трампа миллионера Питера Тила, который еще в 2009 году заявил: «Я больше не верю, что свобода и демократия совместимы».

**Вперед в прошлое?**

Одним из мыслителей, повлиявших на становление концепции Ланда, является Кертис Ярвин, пишущий под псевдонимом Мэн-цзы Молдбаг, американский программист и видный мыслитель «Новой реакции». Ярвин превозносит рабство, отмечая, что представители определенных рас больше годятся на роль рабов, а также полагает, что феодализм превосходит демократию.

Ярвин грезит о новом феодализме, где королевства будут выглядеть как корпорации, руководители которых станут играть роль королей. Не скованный цепями демократии, руководитель/директор (именно и исключительно в мужском роде, потому что это будет мужчина) станет принимать решения, которые будут благотворны, потому что экономически



целесообразны (выгодны). Директор будет иметь высокий коэффициент умственного развития или даже будет киборгом, продуктом евгеники и технологии.

В 2013 году инвестиционный фонд Тили профинансировал стартап Ярвина Tloп. Позже Ярвин говорил, что наставляет Тили и считает его «полностью просвещенным». Tloп также получил финансовую поддержку со стороны еще одного миллиардера и венчурного капиталиста Марка Андриссена, который назвал Ярвина своим другом. Тиль и Андриссен на президентских выборах 2024 года поддержали Дональда Трампа и после его победы продвигали своих людей в новую администрацию.

Главным политическим протезом Тили является вице-президент Джей Ди Вэнс, которые работал директором одного из его инвестфондов. Вэнс также знаком с трудами Ярвина и в одном из подкастов говорил, что согласен с некоторыми его идеями. На Ярвина неоднократно ссылался и бывший советник Трампа Стив Бэннон. С приходом к власти Трампа Ярвин стал публичной фигурой. Интервью у него берут ведущие издания вроде Politico и The New York Times, а сам он был приглашен на инаугурационный бал нового президента.

Неореакционная составляющая «Темного просвещения» выражается в положении о том, что расы не равны, а женщины годятся лишь для домашнего рабства. Странники NRx вуалируют свой расизм эвфемизмом «человеческое биоразнообразие». Расовая теория прямо связана с их желанием избавиться от демократии: ведь если люди не равны, почему мы должны жить в обществе, где ко всем относятся одинаково? Одни расы по природе своей лучше подходят на роль правителей, чем другие, отсюда опора сторонников «Темного просвещения» на различные формы аристократии и монархии (отнюдь не в символическом смысле, а как традиционное «божественное право» королей).

### Разрушить до основания?

По мнению последователей движения, нынешний миропорядок с его ценностями демократии и прав человека существует благодаря Собору (другие конспирологи называют его Новым мировым порядком) — консенсусу академических кругов, прессы и политического истеблишмента, закрепляющему статус-кво и препятствующему инакомыслию.

Собор — это:

- либеральный прогрессизм как религия;
- университеты как механизм рекрутирования элит;
- пресса и культурная индустрия как инструмент распространения идей;
- «глубинное государство» спецслужб и чиновников, которые не подотчетны политическим лидерам и служат сохранению статус-кво либеральных элит.

Современные прогрессивные ценности вроде феминизма, мультикультурализма и расового равенства

для него являются частью секулярной либеральной религии, за отход от которой жрецы Собора предают остракизму.

Что общего у рассматриваемого явления с блокчейном? Во-первых, Ярвин в известном смысле основоположник «Темного просвещения». Его компания Urbit представляет собой одноранговую сеть, состоящую из персональных серверов и позволяющую пользователям владеть их цифровыми идентичностями. Согласно вебсайту Urbit, «сетевые тождества на этой площадке являются криптографической собственностью, как и в случае биткоина». Создатели проекта утверждают: «Если биткоин — это деньги, а Ethereum — закон, то Urbit — это земля».

### Теория на практике

Ярвин изложил свою стратегическую программу с аббревиатурой RAGE, или «уволить всех государственных служащих». Ярвин считает, что администрация Трампа должна уволить всех неполитических федеральных служащих, чтобы заменить их лоялистами. Государственная казна, которой управляет конгресс, должна быть конфискована и перенаправлена. А суды, блокирующие неконституционные указы, Ярвин предлагает просто игнорировать. Затем предлагается устроить этап чисток в университетах и прессе.

Любопытно, знает ли о Ярвине самый богатый человек мира Илон Маск, но его слова: «Государство является всего лишь большой корпорацией» — и массовые сокращения госслужащих, которые проводило его ведомство DOGE, кажутся очень похожими на то, чего требовали сторонники «Темного просвещения».

Когда один из журналистов спросил Ника Ланда, как он относится к работе Илона Маска по сокращению американского правительства, тот ответил: «Это определено то, что мой тип неореакционеров одобрил бы. До эйфории». Параллельно с этим администрация Трампа неоднократно узурпировала контроль над выделенными конгрессом деньгами, игнорировала решения Верховного суда и в настоящий момент требует от университетов подчиниться внешнему управлению со стороны Белого дома. Трамп открыто спекулирует на тему своего третьего президентского срока и в соцсетях шуточно изображает себя в образе короля. В январском интервью Ярвина спросили, пойдет ли Трамп на радикальные изменения, которые он описывает в своих статьях. Тогда философ ответил, что ни Трамп, ни Америка пока не готовы к этому. Но кажется, что первые месяцы президентства Трампа превосходят многие ожидания его сторонников и страхи противников.

«Темное просвещение» определено имеет большую популярность среди технологической новой элиты, сформированной в Силиконовой долине. И при построении отношений с этими элитами основу их мировоззрения необходимо учитывать и, конечно, следить за развитием событий на политическом олимпе США.

Фото: Машиностроительный дивизион «Росатома» / Никита Григорьев

Машиностроители «Росатома» изготовили первую реакторную установку РИТМ-400 для атомного ледокола «Россия», который станет самым мощным атомоходом в мире

