

# Современное состояние безопасности атомных электростанций, перспективы развития атомной энергетики и концептуальные вопросы стратегии развития экологически чистой ядерной энергетики<sup>1</sup>

**В.М. Кузнецов**, профессор, д-р техн. наук<sup>1</sup>

**И.Н. Острецов**, главный научн. сотрудник, д-р техн. наук, профессор<sup>2</sup>

**М.С. Хвостова**, доцент, канд. геогр. наук<sup>1</sup>

**М.А. Шингаркин**, депутат Государственной Думы Федерального Собрания Российской Федерации<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Кафедра Океанотехники и энергетических установок Института судостроения и морской арктической техники (Севмашвуз) филиала Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, г. Северодвинск

<sup>2</sup> Академия геополитических проблем России, Москва

<sup>3</sup> Государственная Дума Федерального Собрания Российской Федерации 6-го созыва

e-mail: kuznetsov1956@mail.ru, marinakhvostova@list.ru, igor-ostrecov@yandex.ru

## Ключевые слова:

атомные электростанции, радиоактивные отходы, отработавшее ядерное топливо, стресс-тесты, ядерная и радиационная безопасность, ядерная релятивистская технология.

Рассмотрено современное состояние безопасности атомной энергетики. Представлены краткие итоги стресс-тестов для атомных электростанций в странах Евросоюза и в России. Показано, что энергетика на реакторах-размножителях не получит развития в силу ее низкой эффективности, высокой стоимости и риска распространения ядерных материалов. Кроме того, строительство на площадках АЭС с бридерами производства по переработке плутония, изготовление смешанного уран-плутониевого ядерного топлива и образование в отработавшем ядерном топливе америция-241 ставят под сомнение вопросы обеспечения экологической безопасности. Рассмотрены концептуальные вопросы создания экологически чистой атомной энергетики на базе ядерной релятивистской технологии. Показано, что такая энергетика не будет производить «бомбовые» материалы и, следовательно, найдет широкое применение во всем мире. Тем самым будут решены сложнейшие международные проблемы современности. Новая атомная энергетика может стать основой для производства водорода. Это обстоятельство позволит решить практически все, включая даже пищевые, проблемы человечества за счет ядерной энергии.

## 1. Безопасность атомной энергетики в постфукусимский период

Состояние мировой ядерной энергетики на 01.03.2014 г. отражают следующие цифры:

- 438 действующих энергоблоков с установленной мощностью 374 332 МВт (эл.), среди них

64 энергоблока старше 40 лет, установленная мощность которых равна 39 091 МВт (эл.);

- 71 энергоблок в стадии строительства, установленная мощность 70 612 МВт (эл.).

В России на данный момент эксплуатируется 33 энергоблока на 10 атомных электростанциях:

<sup>1</sup> От редакции. В статье рассматриваются состояние и проблемы развития атомной энергетики, критикуются современные подходы к ее развитию. Авторы предлагают новое направление исследований, ориентированных на создание ядерной релятивистской технологии. Статья носит дискуссионный и спорный характер. На статью поступили противоречивые рецензии, которые приведены после статьи. Редакция посчитала возможным опубликовать как дискуссионную статью в качестве частного мнения авторов, так и мнения оппонентов. Редакция предлагает специалистам в данной области высказать свое мнение по поводу проблем, затронутых в статье, и предложений авторов.

17 энергоблоков с реакторами типа ВВЭР (11 энергоблоков ВВЭР-1000 и 6 энергоблоков ВВЭР-440 различных модификаций); 15 энергоблоков с канальными реакторами (11 энергоблоков с реакторами типа РБМК-1000, 4 энергоблока с реакторами типа ЭГП-6); 1 энергоблок с реактором на быстрых нейтронах с натриевым охлаждением БН-600. Кроме того, четыре энергоблока (блоки №№ 1, 2 Белоярской АЭС, блоки №№ 1, 2 Нововоронежской АЭС) остановлены для дальнейшего вывода из эксплуатации. Все энергоблоки оборудованы приреакторными хранилищами отработанного ядерного топлива (ОЯТ). На территории 4 атомных электростанций сооружены отдельные комплексы для хранения ОЯТ. Четыре энергоблока находятся в стадии строительства.

Совет Европейского Союза (ЕС) 25 марта 2011 г. принял решение о переоценке безопасности европейских АЭС на основании всесторонней открытой оценки риска, т.е. путем проведения стресс-тестов. Экспертная Европейская группа регуляторов в сфере ядерной безопасности 13 мая 2011 г. согласовала методику проведения и критерии стресс-тестов. В соответствии с требованиями ENSREG<sup>1</sup> стресс-тесты должны быть выполнены для переоценки запасов безопасности АЭС в свете событий, происшедших на АЭС Фукусима-1 в Японии, т.е. означали проверку АЭС на устойчивость к маловероятным кризисным событиям. В рамках стресс-тестов специалисты должны были детально проанализировать экстремальные природные события и их комбинации, способные оказать влияние на безопасность АЭС.

В Европе стресс-тесты были выполнены на 145 реакторах в 14 государствах. По результатам выяснилось, что на момент аварии на АЭС Фукусима-1 оценка риска землетрясения отсутствовала для 54 реакторов, оценка риска наводнения — для 62. Система вентиляции для сброса давления в защитной оболочке реактора в случае происшествий отсутствовала на 32 реакторах. Кроме этого, по результатам стресс-тестов было принято решение об установке системы предупреждения о возможном землетрясении на 121 реакторе европейских АЭС. Как заявил еврокомиссар по энергетике Гюнтер Эттингер, модернизация атомной энергетики обойдется Евросоюзу в 25 млрд евро. «Практически все европейские станции нуждаются в модернизации для повышения безопасности. Однако стресс-тесты не выявили необходимости немедленного закрытия АЭС», — отметил Эттингер.

В июне 2011 г. была созвана Конференция по ядерной безопасности на уровне министров с целью определить направления для извлечения уроков и принятия соответствующих мер после аварии на АЭС «Фукуси-

ма-Дайичи». Конференция предложила генеральному директору МАГАТЭ подготовить План действий.

В сентябре 2011 г. состоялось заседание Генерального комитета пятого Совещания по рассмотрению Конвенции о ядерной безопасности в рамках 55-й Генеральной конференции МАГАТЭ, где был принят «План действий МАГАТЭ по ядерной безопасности». План давал государствам-членам рекомендации и определял программу работ по укреплению глобальной системы ядерной безопасности. План предусматривал ряд мер, включая следующие основные пункты (действия):

- провести оценку уязвимых мест в обеспечении безопасности АЭС в свете уроков, извлеченных из аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи»;
- усилить проводимые МАГАТЭ внешние экспертные оценки, осуществляемые силами специалистов государств-членов, с целью обеспечения максимальной пользы для государств-членов;
- укрепить аварийную готовность и реагирование;
- повысить эффективность национальных регулирующих органов;
- повысить эффективность эксплуатирующих организаций в части ядерной безопасности;
- проверить и усилить нормы безопасности МАГАТЭ и улучшить их применение;
- повысить эффективность международно-правовой основы.

В отношении государств, планирующих развитие ядерно-энергетической программы:

- содействовать развитию инфраструктуры, необходимой для начала реализации государствами-членами ядерно-энергетической программы;
- укрепить и поддерживать создание кадрового потенциала (образование, подготовка кадров и т.д.);
- обеспечить непрерывную защиту людей и окружающей среды от воздействия ионизирующих излучений в случае ядерной аварии;
- повысить прозрачность и эффективность информационного обеспечения и информационного взаимодействия и улучшить распространение информации;
- провести научно исследовательские и опытно-конструкторские работы и эффективно использовать их результаты.

Государствами-членами, включая Россию, были разработаны и приняты национальные программы мероприятий для реализации этого плана (см.: Программа мероприятий по участию заинтересованных российских ведомств и организаций в реализации Плана действий МАГАТЭ по ядерной безопасности).

<sup>1</sup> European Nuclear Safety Regulators Group.

Вызывает удивление тот факт, что в этом «Плане действий» нет никакой информации о проведении стресс-тестов на предприятиях ядерного топливного цикла, действующих на территории ЕС. Также отсутствует информация о проведении таких тестов на исследовательских ядерных установках, местах хранения или захоронения радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива.

## 2. Результаты стресс-тестов российских атомных электростанций

В Европе оценка устойчивости всех действующих АЭС была выполнена в три этапа — операторами АЭС, национальными атомными агентствами и экспертами Еврокомиссии и Совета ЕС. Украина и другие европейские страны, эксплуатирующие атомные станции, но не входившие на тот период в ЕС, последовали рекомендациям Совета ЕС и провели стресс-тесты, используя методики ENSREG и оценки независимых европейских экспертов. Россия выполнила эту работу самостоятельно, без привлечения внешних экспертов в рекордно короткие сроки (две-три недели). Причем проверки в России были проведены с привлечением журналистов и ничего не понимающими в обеспечении ядерной и радиационной безопасности ангажированными представителями общественных групп и движений, которые утверждали, что безопасность АЭС находится на самом высоком уровне.

В марте-апреле 2011 г. Ростехнадзор по указанию Правительства РФ провел внеплановые инспекции действующих АЭС по следующим направлениям: защищенность от внешних экстремальных воздействий природного и техногенного происхождения, в том числе от воздействий с интенсивностью, которая учитывается в проектных основах АЭС, а также защищенность от сочетаний внешних воздействий (как зависящих друг от друга, так и независимых); готовность к управлению запроектными авариями с полным обесточиванием собственных нужд АЭС; готовность к управлению авариями с потерей систем отвода тепла от ядерного топлива, находящегося в реакторах, а также в хранилищах ОЯТ, к конечному поглотителю; готовность к управлению тяжелыми авариями (когда произошло значительное повреждение ядерного топлива с превышением проектных пределов, сопровождающееся значительным выходом радиоактивных веществ из-под оболочек тепловыделяющих элементов). Результаты этих внеплановых проверок не были обнародованы.

### 2.1. Сейсмостойкость

Отмечается, что величины проектного и максимального расчетного землетрясений атомные станции преодолевают без ущерба для безопасности.

Однако необходимо реализовать дополнительные проектные решения по обеспечению сейсмостойкости некоторого оборудования, не являющегося основным, но необходимого для безопасности объектов. Для части оборудования, важного для безопасности (например, береговые насосные станции и каналы трубопроводов системы технической воды на площадке Кольской АЭС, отдельные строительные конструкции главного корпуса на Билибинской АЭС), по результатам анализа запланирована актуализация обоснований его сейсмостойкости.

Кроме этого, отмечается, что необходимо дополнительно выполнить анализ влияния на оборудование атомных блоков сейсмических воздействий большей интенсивности, чем заложено в проекте. Выявлено, что на нескольких АЭС (Билибинская, Кольская, Курская, Нововоронежская) системы сейсмометрического контроля и сигнализации не могут воздействовать на систему аварийной защиты и другие органы регулирования системы управления и защиты реактора.

Ничего не сообщается о планируемых работах по исследованию сейсмичности зданий, сооружений и оборудования бассейнов выдержки ОЯТ. Кроме этого, нет информации о результатах тестирования одновременного воздействия на АЭС землетрясения и других природных факторов (например, затопления, урагана).

### 2.2. Риски затопления

Отмечается, что площадки российских АЭС не подвержены воздействию цунами. При исследовании возможности затоплений, вызванных иными, нежели цунами, причинами (нештатными ситуациями на гидротехнических сооружениях — прорыв плотин, размыв дамб, экстремальные осадки и др.), специалисты пришли к выводу, что для большинства АЭС вероятности затопления нет.

Однако штатные ситуации (например, прорыв плотины) могут привести к затоплению станции подпитки градирен энергоблоков № 3 и 4 Нововоронежской АЭС. Негативное влияние этого фактора компенсировано мероприятиями по оснащению АЭС с рисками потери внешнего энергоснабжения мобильными системами организации отвода тепла к конечному поглотителю (дизель-насосы, мотопомпы, быстросборные трубы и т.д.).

### 2.3. Прочие природные и техногенные воздействия

Отмечается, что выполненные стресс-тесты подтвердили защищенность российских АЭС от внешних воздействий, которые учитываются в проектах станций. Кроме этого, при проведении стресс-тестов было изучено влияние сочетания внешних воздействий, вероятность возникновения которых признается экспертами.

Вместе с тем для отдельных АЭС (Нововоронежская, Смоленская) был сделан вывод о необходимости выполнить дополнительные уточняющие расчеты в отношении стойкости строительных конструкций к ураганам, смерчам, а также к экстремальным снеговым нагрузкам.

На энергоблоках № 3 и 4 Нововоронежской АЭС не обеспечивается стойкость кровли машинного зала при воздействии ураганного ветра со скоростью выше 35 м/сек. Также не обеспечивается стойкость открытого распределительного устройства (ОРУ) при воздействии смерча класса 3.2 по шкале Фуджиты<sup>1</sup>.

На Смоленской АЭС выявлена недостаточная устойчивость отдельных наружных ограждающих конструкций к воздействию воздушной ударной волны свыше 1.5 кПа.

Кроме этого, нет информации о результатах возможного воздействия внешних пожаров, экстремально высоких/низких температур, экстремальных ветров (ударных волн) и летящих при этом предметов.

#### 2.4. Обеспечение электроснабжения

В официальных отчетах отмечается, что по результатам стресс-тестов запланировано оснастить все блоки атомных станций дополнительными техническими средствами, в том числе передвижными дизель-генераторами мощностью 0,4 кВ и 6 кВ, использование которых обеспечит длительное поддержание блоков АЭС в безопасном состоянии в условиях полного обесточивания. Кроме этого, для блоков с реакторами типа РБМК дополнительно запланировано выполнить расчетно-экспериментальное обоснование возможности пассивного (воздушного) охлаждения активной зоны. На отдельных АЭС запланированы дополнительные меры по повышению надежности электроснабжения при нормальной эксплуатации (от энергосистемы), а также мероприятия по организации резервных (дополнительных) систем охлаждения для штатных аварийных дизель-генераторов. Подробной информации о том, на каких АЭС запланированы такие меры, найти не удалось.

#### 2.5. Обеспечение отвода тепла

Проблема отвода тепла — это главная задача, которую необходимо решать для обеспечения безопасности атомной электростанции. Не имеет значения, природное или техногенное воздействие на АЭС может иметь место, но в итоге при любом воздействии возникает проблема обеспечения отвода тепла от активной зоны или бассейна выдержки ОЯТ.

По результатам стресс-тестов на российских АЭС выявлена необходимость оснастить все блоки АЭС специальными техническими средствами — это передвижные мотопомпы, сухотрубы, автомобили-

цистерны. Кроме этого, необходимо дополнительно оборудовать пункты забора охлаждающей воды из водоемов и бакового хозяйства, позволяющие организовать, при необходимости, нештатную схему подачи воды для охлаждения активных зон, бассейнов выдержки, хранилищ ОЯТ, чтобы исключить переход аварии с потерей систем отвода тепла к конечному поглотителю в тяжелую стадию.

Это может означать, что до аварии на АЭС «Фукусима-Дайичи» таких средств на российских АЭС не было или их было недостаточно.

#### 2.6. Управление тяжелыми (запроектными) авариями

При выполнении стресс-тестов проверялась организация технических мероприятий для управления тяжелыми авариями. Было выявлено, что на ряде блоков атомных станций (перечень не раскрывается) необходимо реализовать дополнительные меры: дооснащение блоков АЭС системами водородной взрывозащиты и контроля концентрации газов, образующих горючую смесь; обустройство герметичного ограждения блоков водо-водяных энергетических реакторов системами сброса давления; модернизация блоков АЭС комплектом контрольно-измерительных приборов, сохраняющих работоспособность в условиях тяжелой аварии.

Кроме этого, на российских АЭС необходимо выполнить вероятностный анализ безопасности второго уровня. В рамках этого анализа необходимо выработать стратегии управления тяжелыми авариями и обосновать достаточность имеющихся для этого либо планируемых к внедрению технических средств. Также было предложено разработать руководящие документы по управлению тяжелыми авариями на блоках АЭС (перечень не раскрывается), для которых указанные документы еще не разработаны. Стресс-тесты выявили, что в рамках улучшения управления авариями, как тяжелыми, так и иными, необходимо дополнительно выполнить мероприятия по обеспечению надежной работы средств связи в условиях запроектных аварий (как на площадке АЭС, так и для взаимодействия с кризисными центрами); по повышению защищенности мест пребывания персонала (прежде всего — пунктов управления блоками АЭС); по доработке противоаварийной документации, в том числе для отражения в ней сценариев, в которых нарушение нормальной эксплуатации (аварии) затрагивает сразу несколько блоков многоблочной АЭС.

#### 2.7. Наличие и достаточность нормативной базы

По результатам стресс-тестов было признано, что необходимо доработать российскую нормативную базу в части дополнения требований к противоаварийной документации; требований к учету внешних

<sup>1</sup> Параметры шкалы Фуджиты см. в: Безопасность в техносфере. 2013. № 5.

воздействий природного и техногенного характера в проектах АЭС (в том числе к обеспечению безопасности АЭС при воздействиях, интенсивность которых превышает учитываемую в проектах); требований к выбору площадок размещения атомных станций. В правила проектирования сейсмостойких АЭС следует внести требования к объему и содержанию отчетов по обоснованию безопасности атомных станций, а также реализации на блоках атомных станций концепции безопасности «течь перед разрушением».

По результатам проведенных стресс-тестов сделаны выводы, что на российских АЭС необходимо провести дополнительные технические, научные и организационные мероприятия для повышения их безопасности в свете событий на АЭС Фукусима-1. После изучения доступных для анализа материалов российских ведомств, а также материалов МАГАТЭ и других международных институтов, работающих в области атомной энергетики, складывается впечатление, что формально российская сторона выполнила все рекомендации, разработанные международным сообществом после событий на Фукусиме.

Насколько ответственно и в полной ли мере это было сделано на практике, покажет только время. Также нужно отметить, что, как и в ЕС, в России стресс-тестами не были охвачены предприятия ядерного топливного цикла (ЯТЦ), в том числе на которых ранее произошли радиационные аварии в результате воздействия природных аномалий (ОАО ПО «Маяк», 1966, 1967 гг.). Не были проведены тесты на предприятиях атомной отрасли, эксплуатирующих ядерные исследовательские установки (ОАО «НИИ-АР», ЦНИИ им. А.Н.Крылова, НИЦ «Курчатовский институт» и др.), в пунктах захоронения радиоактивных отходов (бывшие предприятия системы «Радон»), атомном ледокольном флоте и судах атомного технического обслуживания, а также судостроительных заводах, осуществляющих строительство, ремонт, модернизацию и утилизацию судов с ядерными энергетическими установками.

### 3. Перспективы развития мировой атомной энергетики

По мере роста масштабов ущерба в результате аварии на АЭС «Фукусима» в денежном выражении (японские официальные лица сейчас оценивают его в 64 млрд долл.) будущее атомной энергетики тает на глазах. Развитые страны ограничивают или вообще закрывают свои программы в области атомной энергетики, а государства, расположенные в горячих точках мира (Ближний Восток и Дальний Восток), стремятся строить собственные реакторы.

При нормальных условиях это привело бы к росту внимания к вопросам ядерной безопасности и нерас-

пространения ядерного оружия. Но, учитывая насколько уменьшились продажи атомных реакторов в ведущих странах, оба этих пункта отошли на второй план по сравнению с желанием стран — поставщиков ядерных технологий использовать то, что остается от рынка атомных реакторов. Конечно, возможности в области продаж ядерных реакторов и технологий сейчас гораздо меньше, чем были когда-то.

Германия на постоянной основе закрыла восемь из своих реакторов и пообещала закрыть остальные к 2022 г. Вскоре после этого итальянцы подавляющим большинством проголосовали за то, чтобы сохранить свою страну неядерной.

Швейцария и Испания последовали этому примеру, запретив строительство новых реакторов. Премьер-министр Японии закрыл планы своей страны по расширению арсенала атомных станций, пообещав радикально уменьшить степень зависимости страны от атомной энергии. То же самое сделал президент Тайваня. Сейчас Мексика откладывает строительство десяти реакторов в пользу развития электростанций на природном газе, а Бельгия рассматривает возможность полного отключения своих атомных станций, возможно, уже к 2015 г.

Даже наиболее проядерно настроенные государства мира после Фукусимы испытали реакцию общественности, которая заставила их отложить или пересмотреть свои планы. Китай (самый крупный перспективный рынок для атомной энергетики) приостановил одобрение строительства новых реакторов, начав длительные исследования по ядерной безопасности. Планы в области ядерных мощностей на 2020 г. были снижены на 30%. Ключевым узким местом является недостаток специалистов в области атомной энергетики. Чтобы поддерживать обозначенные цели в этой сфере, Китай должен готовить в атомном секторе примерно 6000 экспертов в год. Сейчас его высшие учебные заведения готовят едва ли 600 человек.

Соседняя Индия — еще один потенциальный рынок для атомной энергетики — имеет комплекс проблем: активная местная оппозиция, рост обеспокоенности по поводу иностранных атомных реакторов и разногласия по поводу ядерной ответственности. Эти проблемы могут помешать импорту новых реакторов. Индия ввела в строй первый из двух реакторов российского производства в подверженном угрозе цунами штате Тамилнад. Однако после Фукусимы местные жители провели серию голодовок протеста, и открытие станции было отложено. Еще более негативная антиатомная реакция в штате Западная Бенгалия вынудила местные власти закрыть крупный российский проект в Хариपुरе. Сейчас также блокируется еще более круп-

ный французский проект строительства реактора в Джайтапуре. В 2010 г. Россия и Индия подписали «дорожную карту», которая предусматривает серийное строительство 14–16 энергоблоков АЭС по российским проектам. Индия планирует до 2017 г. соорудить 19 энергоблоков АЭС общей мощностью 17,4 тыс. МВт, 8 из которых будут построены при участии других стран. Речь идет, в частности, о строительстве при техническом содействии России третьего и четвертого энергоблоков станции «Куданкулам» мощностью 1 тыс. МВт каждый. АЭС «Куданкулам» будет обеспечивать электроэнергией не только штат Тамилнад, но и весь юг Индии.

В США процессы строительства новых реакторов также пострадали, но не из-за общественного противодействия, а из-за экономических проблем. Еще до аварии на Фукусиме избыток относительно чисто сгорающего природного газа и недостаток финансирования проектов, стоимость реализации которых настолько выросла, что вышла из-под контроля, дали основания предполагать, что ядерный ренессанс угаснет. Авария на Фукусиме превратилась в угрозу, которая может стать катализатором принятия более жестких норм в области безопасности. В итоге: если в 2007 г. американские предприятия подали в Комиссию по регулированию атомной отрасли (Nuclear Regulatory Commission) заявки на строительство 28 атомных станций до 2020 г., то теперь крупным достижением будет ввод в строй до конца десятилетия хотя бы 3 АЭС.

Франция — самая атомная страна в мире, если учитывать ее мощности АЭС в пересчете на душу населения. Часто представляемая для всего мира как образец коммерческих отношений в атомном секторе, сейчас Франция погрязла в общенациональных дебатах по поводу возможного частичного вывода из обращения атомных мощностей. Экс-президент Франции Николя Саркози поддерживал атомную энергетику, но социалист Франсуа Олланд, став президентом страны, предложил к 2025 г. сократить долю АЭС в производстве энергии более чем на ½. Наблюдается явное изменение французского общественного мнения: если до аварии на Фукусиме ¾ французов поддерживали атомную энергетику, то сейчас 62% выступают за постепенное сокращение мощностей АЭС. Французский суд обязал энергетического гиганта EDF выплатить Greenpeace 1,5 млн евро за незаконный шпионаж за экологами. Общественная поддержка этого решения и то, что французская Социалистическая партия добивается расположения французских «зеленых», минимизируют вероятность отказа Олланда от своего обещания.

Какие хорошие новости для атомной отрасли? Ряд новых реакторов может быть построен в Восточной

Европе и Великобритании, несколько в Южной Корее. Россия продвигает проекты строительства реакторов в Бангладеш, Индии, Венгрии, Чехии, Финляндии, Иордании, Вьетнаме, Иране и Турции.

Все чаще и активнее в развитие атомной энергетики вмешивается политика. Так, в результате событий на Украине президент Чехии Милош Земан высказался в поддержку идеи нового тендера на строительство двух энергоблоков чешской АЭС «Темелин», в котором могли бы принять участие четыре претендента. Завершающийся ныне тендер глава государства предлагает оставить без объявления победителя. По словам президента Чехии, среди участников нового конкурса, кроме японско-американской фирмы Westinghouse и российско-чешского консорциума MIR.1200 в составе чешской Skoda JS и российских ЗАО «Атомстройэкспорт» и ОАО ОКБ «Гидропресс», которые вышли в финал нынешнего тендера, может быть французская компания Areva. Четвертым участником нового тендера на достройку чешской АЭС «Темелин» мог бы стать один из южнокорейских инвесторов. «Давайте подождем их предложений, подождем нового тендера. Четыре участника — это не два, и тогда есть надежда на снижение цены», — пояснил глава Чехии. Стоимость контракта на достройку двух энергоблоков оценивается в 15 млрд долл. Строительство предполагалось начать в 2016 г., а подключить новые энергоблоки к национальной энергосистеме не позднее 2025 г. [4].

США, Франция, Япония и Южная Корея — все хотят получить аналогичные сделки в Иордании, Вьетнаме, Турции и Саудовской Аравии. Китай продолжает расширять группировку атомных реакторов Пакистана.

Следует отметить, что ни у одного из указанных «ядерных клиентов» нет достойной системы регулирования ядерной безопасности. Кроме Пакистана, ни в одной из этих стран нет достаточного количества обученного персонала в атомном секторе, который мог бы работать над крупными программами в области атомной энергетики. Следует подчеркнуть, что Турция, Сирия, Иран, Алжир, Египет и Саудовская Аравия либо уже имеют возможности в области разработки ядерного оружия, либо стремятся к их получению, а Пакистан уже обладает ядерным оружием. Египет, Турция, Иордания, Вьетнам и Саудовская Аравия неоднократно отклоняли американские призывы прекратить производить ядерное топливо — процесс, который способен за несколько недель превратить страну в государство, обладающее ядерным оружием. Кроме того, Иран, Египет, Алжир и Сирия были замечены в нарушении мер и стандартов в области безопасности Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ).

Так что же движет странами, которые являются поставщиками атомных технологий на планете, в их желании обслуживать подобные государства в ядерном секторе?

*Во-первых, деньги.* Когда перспективы продаж реакторов в странах развитых экономик иссякли, большинство поставщиков ядерных технологий были вынуждены обратить свой взор на менее развитые и потенциально более прибыльные рынки на Ближнем и Дальнем Востоке. На самом деле поставщики ядерных технологий просто расталкивают друг друга, стремясь реализовать контракты на этом рынке, особенно Южная Корея, которая дебютировала в качестве ядерного экспортера, заключив договор на 20 млрд долл. по строительству четырех атомных реакторов в Объединенных Арабских Эмиратах. Россия планирует активизировать свою работу по строительству реакторов в иранском Бушере. Россия рассчитывает, что на этом месте в Иране появится как минимум четыре новых крупных ядерных реактора. Саудовская Аравия объявила уже после аварии на Фукусиме, что планирует в период до 2030 г. потратить 112 млрд долл. на покупку 16 реакторов вместе со всей необходимой инфраструктурой. Турция, в которой Россия уже строит реактор, объявила конкурс на строительство еще одного реактора и планирует завершить возведение еще 18 реакторов к 2030 г.

*Во-вторых, геополитика.* Россия продает Турции реактор по себестоимости или даже ниже. Почему? Россия хочет получить рычаг влияния на своего соседа, который способен помешать планам России по строительству нефтепроводов. Что касается Ирана, то Россия хочет выступать в качестве самостоятельного игрока, независимого арбитра в международных спорах Тегерана по атомному вопросу.

Что же касается Вьетнама, то США пытаются сдержать Китай в предполагаемой реакторной сделке. Однако достижение соглашения о сотрудничестве показывает, что США передают Вьетнаму необходимые технологии и ноу-хау. Это открывает дверь и для других потенциально возможных стратегических продаж ядерных технологий. Эти выгоды достигаются без необходимости для США продавать реакторы напрямую Вьетнаму, так как Япония, которая строит американские реакторы, может сделать это вместо них. Также это легко осуществить законодательно: соглашения о сотрудничестве США в области атомной энергетики могут быть заблокированы только маловероятным квалифицированным большинством палаты представителей и сената.

Не секрет, что Саудовская Аравия не отказалась от идеи получить атомную бомбу. «Мы не можем жить и существовать в такой ситуации, когда у Ирана есть атомная бомба, а у нас нет», — заявил саудов-

ский официальный представитель. «Все просто. Если Иран разработает ядерное оружие, это будет неприемлемо для нас, и нам придется последовать его примеру». Тегеран, возможно, активно разрабатывает атомное оружие, хотя утверждает, что его ядерная программа носит исключительно мирный характер и направлена на решение задач энергетики. Власти Саудовской Аравии обдумывали планы получения бомбы от Пакистана. А больше всего они хотят реакторы американской конструкции. Следовательно, соглашение о сотрудничестве с США — самое желанное. Высокопоставленные чиновники США оправдывают стремление заключить подобную договоренность не столько промышленными причинами, сколько доводами в пользу того, что это будет способствовать нераспространению ядерного оружия. Их мышления напоминает британские аргументы XVIII в. о том, что британцы должны оставаться в секторе работоторговли, чтобы ее контролировать. Возможно, нынешние американские чиновники и их аргументы заслуживают доверия и даже вполне правдоподобны, за исключением одной маленькой детали. Президент США Б. Обама в настоящее время выступает против предложенных законопроектов, которые ужесточат требования в области нераспространения применительно к американскому сотрудничеству с другими странами в ядерной области. В последнее время США в контексте событий на Украине сокращают сотрудничество с Россией.

В апреле 2012 г. Комитет по внешнеполитическим отношениям сената США проголосовал 34 голосами «за» в пользу принятия закона H.R. 1280. Законопроект требует, чтобы обе палаты парламента голосовали, давали свое одобрение американских соглашений в области атомной энергетики с теми странами, которые не хотят отказываться от производства ядерного топлива или принимать у себя инспекции МАГАТЭ. Разумное объяснение тут заключается в том, что когда Объединенные Арабские Эмираты (ОАЭ) согласились на такие условия в своем соглашении, США должны обеспечивать сотрудничество на тех же условиях и с другими государствами.

Администрация Б. Обамы, которая назвала эти условия новым золотым стандартом, сейчас заняла другую позицию — они не хотят ничего делать с этим законодательством. Саудовская Аравия наняла юридическую фирму «Pillsbury», одного из ведущих лоббистов в Вашингтоне, чтобы обеспечить сотрудничество с США в атомной области без этих условий.

Выразит конгресс США несогласие или нет, заставит или нет президента Обаму работать жестче, чтобы убедить мировых поставщиков ядерных технологий принять условия, принятые с ОАЭ, для своего атомного экспорта, остается неясным. Но ясно, что

если эти усилия не увенчаются успехом и ядерные страны продолжат свое движение на юг, избежать повторения инцидентов, подобных Фукусиме, станет сложнее. Но этот вызов может оказаться незначительным по сравнению с задачей предотвратить гонку ядерных вооружений на Ближнем и Дальнем Востоке.

#### 4. Недостатки современной атомной энергетики

Если рассматривать энергетические проблемы человечества в перспективе, то следует признать, что ни современные ядерные реакторы, ни ядерное топливо на основе урана не являются панацеей. *Ограничения связаны с их имманентными* (внутренне присущими) *недостатками*. Назовем некоторые.

1. Низкая эффективность (неэкономичность) использования топлива и деградация нейтронного потенциала (отсутствие воспроизводства ядерного горючего). Действующие сегодня реакторы используют около 1% добываемого урана.

2. Разведанные на Земле запасы урана по приемлемой в настоящее время цене составляют 4,7 млн т. Одному реактору мощностью 1 млн кВт в год требуется примерно 180 т природного урана. Реакторов 440. Итого — 79 200 т в год. Делим 4,7 млн на 79 200 и получаем примерно 59 лет. Один ресурс для 5% энергопотребления на современном уровне. А при росте, намеченном Китаем, может оказаться существенно меньше. Конечно, в перспективе можно рассматривать добычу урана и по более высокой цене. Но чем выше цена, тем меньше потребителей, а сегодня стоит вопрос о резком увеличении числа потребителей энергии, например, в развивающихся странах.

3. Накопление радиоактивных отходов (РАО) и облученного ядерного топлива (ОЯТ) пропорционально выработке электроэнергии. В России к началу 2014 г. на АЭС и в хранилищах радиохимических заводов накоплено 23 тыс. т ОЯТ, их объем увеличивается на 950 т ежегодно. В мире накоплено уже более 420 тыс. т ОЯТ и ежегодно эта цифра возрастает на 14–16 тыс. т. Только незначительная часть ОЯТ перерабатывается на радиохимических заводах. Уплотненное хранение облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС) лишь временно снимает вопрос об их размещении и, как следствие, ставит проблему дальнейшей эксплуатации АЭС. Особенно остро эта проблема стоит на АЭС с реакторами РБМК. На АЭС России происходит накопление ОЯТ в густонаселенных районах Европейской части. В объеме ОЯТ, который накоплен в России, содержание плутония составляет около 215 т.

4. При современных масштабах ядерной энергетики (ЯЭ) в мире на АЭС ежегодно нарабатывается до 93 т высокофонового плутония, который являет-

ся особым веществом в проблеме негативного воздействия на окружающую среду. Помимо высокой  $\alpha$ -активности, плутоний химически токсичен.

5. Остаточная активность плутония, трансплутониевых элементов, нептуния и продуктов деления, на несколько порядков превосходящая активность природного урана, представляет радиоэкологическую опасность на тысячелетия. Поэтому их изоляция от окружающей среды (помимо сложности технических решений) требует колоссальных финансовых затрат, а любое существенное нарушение в обращении может привести к крупной экологической катастрофе. В настоящее время ни одна страна не перешла к использованию технологий, позволяющих полностью решить проблему обращения с ОЯТ. Во всех ядерных странах ведутся НИОКР по разработке эффективных способов снижения негативного влияния ОЯТ.

6. Сегодняшняя ситуация с РАО в России достаточно напряженная. На ее территории накопилась почти половина всех РАО мира, их активность превысила  $7,65 \times 10^{19}$  Бк. Около 99% РАО сосредоточено на предприятиях Росатома, в том числе все высокоактивные и подавляющая часть среднеактивных отходов. Сооружение на объектах ЯЭ многочисленных временных хранилищ в железобетонных конструкциях или в транспортбельных контейнерах принципиально проблему не решает и требует дополнительных затрат на безопасное обращение с РАО.

7. В России существенной экономической характеристикой РАО является их «отрицательная стоимость». Затраты на обезвреживание РАО не включаются в стоимость конечного продукта и рассматриваются (наряду с другими природоохранными затратами) как непроизводительные. Поэтому они финансируются по остаточному принципу. Отсутствует закон о государственной политике обращения с ОЯТ. В ближайшее десятилетие при закрытии устаревших производств и снятии с эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов объемы РАО значительно возрастут. Стоимость переработки и захоронения  $1 \text{ м}^3$  ЖРО составляет от 3 до 10 тыс. долл. Это означает, что объем необходимых ежегодных затрат на обращение с образующимися РАО в нашей стране будет эквивалентен стоимости нескольких АЭС. Наступает момент, когда всего тарифа не хватает для обслуживания отходов.

8. Потенциальная угроза неконтролируемого использования делящихся материалов. Рынок ЯЭ не сжимается, а расширяется: 80 стран мира желают иметь ЯЭ. Государство, получающее доступ к ЯЭ, находится на середине пути к созданию ядерного оружия. Один энергетический реактор мощностью 1000 МВт производит в год плутония, достаточного для изготовления 40–50 ядерных боезарядов. Даже

в исследовательских реакторах мощностью несколько МВт можно быстро наработать количество плутония, необходимое для создания маленькой бомбы. Если в мире будет действовать несколько тысяч ядерных блоков, то невозможно пресечь пути утечки ядерных материалов. КНДР убедительно продемонстрировала неэффективность Договора о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО).

9. Высокая стоимость ЯЭ, по крайней мере, для большинства развивающихся стран. По данным ОЭСР<sup>1</sup>, в 2013 г. удельные капитальные затраты превышали 4,5 млрд долл. на 1 ГВт установленной мощности АЭС с легководными реакторами. Стоимость нового ядерного энергоблока финской АЭС «Олкилуото» составляет сейчас 5 млрд евро (примерно 6,9 млрд. долл.). Это в 5,5–8 раз больше объема инвестиций в строительство ТЭС с парогазовой установкой, которая вводится в строй в 3–4 раза быстрее, чем АЭС.

10. Массовый вывод АЭС, отработавших свой ресурс, в ближайшие годы вызовет чрезмерные нагрузки на бюджеты стран. Так, демонтаж пяти реакторов ВВЭР-440 (построенных СССР) на АЭС в Грейсвальде (Германия, построена в ГДР), строительство хранилищ для ТРО, дезактивация площадки и объектов для создания на этом месте технопарка велись десять лет и стоили Германии 4,5 млрд евро.

При увеличении объема производства ЯЭ будет возрастать давление рассмотренных факторов на экономические показатели, индексы безопасности АЭС и уровень глобальной политической нестабильности. Для многих стран, не имеющих инфраструктуры ЯТЦ, реализация планов сооружения АЭС при неизбежно жестком выполнении ДНЯО может быть осложнена или отложена на неопределенное время. Таким образом, одной из наиболее актуальных задач ближайшего будущего станет поиск и инженерное воплощение альтернативных топливных циклов и реакторных технологий — альтернативной ядерной энергетики без использования обогащенного урана и плутония.

Сегодня ЯЭ остро нуждается в свежих научных идеях и технологических инновациях. Вовлечение новых сил, знаний и опыта в решение этих задач — это необходимая и актуальная задача. Если ЯЭ не будет развиваться, то изменение ЯТЦ (бридеры, переработка ОЯТ) через некоторое время потребует огромных финансовых вложений, масштабы которых трудно представить. Следует начать исследование и создание структуры оптимального ЯТЦ с использованием тория, электроядерных и термоядерных источников нейтронов, решить проблему создания безотходного

по актинидам топливного цикла. В Индии, Канаде и Японии исследуются разные варианты развития ЯЭ. Недостаток — неопределенность научных решений и сомнения — не должен стать причиной сдерживания реализации целей, представляющихся перспективными.

## 5. Ставка на реакторы-размножители

Сегодня Научный исследовательский центр «Курчатовский институт» дает следующие цифры по коэффициентам воспроизводства на различном топливе: оксиды — меньше 1, нитриды — 1,2, металлическое топливо — 1,4 [2]. С нитридами работы практически не проводились, создание технологий с использованием металлического топлива маловероятно. Поэтому по факту современные технологии не обеспечивают воспроизводства топлива. Вклад современных реакторных технологий на перспективу следует прогнозировать на уровне 1%. Если даже принять коэффициент воспроизводства оксидного топлива равным 1,3, то и это не решает проблему. При «сжигании» в активной зоне реактора 1 кг <sup>239</sup>Pu или <sup>235</sup>U в <sup>239</sup>Pu превращается 1,3 кг <sup>238</sup>U. За топливную кампанию (время, которое топливо находится в активной зоне реактора) выгорает около 20% загруженного топлива. Это максимальная величина, так как при выгорании топлива происходят изменение физико-химических свойств тепловыделяющих элементов и их деформация. Кроме того, в топливной композиции накапливаются продукты деления ядерного топлива, которые поглощают нейтроны и уменьшают коэффициент воспроизводства. Ядерное топливо из активной зоны реактора-размножителя нужно периодически выгружать, транспортировать на радиохимический завод, очищать от продуктов деления и вновь возвращать в реактор. Это нужно делать и с загруженным в реактор <sup>238</sup>U — периодически возить на радиохимический завод для извлечения из него накопившегося Pu и для очистки от продуктов деления.

Предположим, в центральную зону реактора-размножителя загружено 100 кг <sup>239</sup>Pu, а в периферийную зону загружен <sup>238</sup>U. После окончания кампании в центральной зоне выгорит 20 кг загруженного <sup>239</sup>Pu, а в периферийной зоне наработается 20×1,3 = 26 кг нового Pu (в том числе <sup>240</sup>Pu). После выгрузки топливных сборок из реактора и выдержки в бассейне-охладителе топливные сборки доставляются на радиохимический завод. Топливо из центральной части реактора очищается от продуктов деления. Из периферийных (урановых) топливныхборок извлекается наработанный Pu. Из 26 кг наработанного Pu

<sup>1</sup> Организация экономического сотрудничества и развития.

более 20 кг (с учетом  $^{240}\text{Pu}$ ) пойдет на восполнение выгоревшего  $^{239}\text{Pu}$  в центральной части реактора, менее 6 кг Pu можно использовать для загрузки в новый реактор-размножитель. И так, за кампанию (без учета потерь топлива при переработке) накапливается менее 6 кг Pu.

Для запуска нового реактора-размножителя такой же мощности при трехгодичном (теоретически минимальном) топливном цикле требуется  $100 : 6 \times 3 = 50$  лет. На самом деле гораздо больше при учете  $^{240}\text{Pu}$ . Таким образом, запуск второго реактора-размножителя при самых благоприятных условиях (без учета влияния  $^{240}\text{Pu}$ ) возможен только через 50 лет после начала работы первого! При таком темпе наработки нового  $^{239}\text{Pu}$  каждые 50 лет происходит удвоение мощности реакторов-размножителей. Если в 2020 г. ввести в эксплуатацию первый реактор мощностью 1000 МВт, то суммарная мощность реакторов-размножителей 2000 МВт будет достигнута только в 2070 г., а мощность 4000 МВт — в 2120 г. Конечно, приведенные расчеты весьма приблизительны, в действительности возможны отклонения от полученных значений, но общая картина понятна: в XXI в. создать крупномасштабную энергетику на реакторах-размножителях не получится.

Все это в полной мере относится и к проекту «Прорыв»<sup>1</sup>. Обсуждать технические проблемы этого проекта и разрабатываемого в его рамках реактора абсолютно бессмысленно, поскольку он просто не нужен с точки зрения требуемых темпов воспроизводства топлива. Это относится и к идее Л. Максимова<sup>2</sup> об использовании реакторов на «тепловых» нейтронах с торием, поскольку даже теоретический коэффициент воспроизводства в этих реакторах около 1,06 и это без учета каких-либо «технологических» потерь. В бридерах на 1 млн кВт будет обращаться примерно 20 т плутония, причем на каждой площадке АЭС. Транспортировать такое количество плутония небезопасно. По данным Министерства обороны США, бомбу можно сделать из 8 кг, при современных технологиях и из энергетического плутония. Стоимость 1 кВт·ч, произведенного на бридерах, на 40–60% выше, чем на реакторах на тепловых нейтронах такой же мощности.

Строительство на площадках АЭС с бридерами производства по переработке плутония, изготовление смешанного уран-плутониевого ядерного топли-

ва и образование в ОЯТ Am-241 усложняют обеспечение экологической безопасности. Именно по этим причинам, а не из-за их технических проблем, бридеров не будет или их количество будет крайне незначительно.

## 6. Ставка на магнитные ловушки — термояд

В мае 1951 г. вышло постановление ЦК ВКП(б) и Совмина СССР об организации работ по управляемому термоядерному синтезу. В 1954 г. в Институте атомной энергии был построен первый в мире Токамак (Тороидальная Камера с Магнитными Катодками) [1]. Именно этот принцип удержания плазмы в термоядерном реакторе используется в современном международном проекте ITER в Кадараше (Франция).

В 1945 г. И.И. Гуревич, Я.Б. Зельдович, И.Я. Померанчук и Ю.Б. Харитон подготовили доклад «Использование ядерной энергии легких элементов», который был заслушан 17 декабря 1945 г. на двенадцатом заседании Технического совета Специального Комитета при Совете народных комиссаров СССР. Доклад был посвящен возможности использования легких элементов, в первую очередь дейтерия и трития, в целях получения взрывных реакций и энергетических применений. Основные выводы, к которым пришли авторы доклада, сводились к следующим тезисам.

1. *«В полном термическом равновесии значительная часть энергии превращается в излучение; это обстоятельство ограничивает равновесную среднюю энергию заряженных частиц порогом 5–15 кэВ, совершенно недостаточным для проведения быстрой ядерной реакции. Медленная ядерная реакция легких элементов при средней энергии около 10 кэВ практически невозможна по той причине, что отвод энергии излучением в ходе медленной реакции приведет к быстрому падению температуры и полному прекращению реакции».*

Все это полностью подтвердилось при попытках реализовать проект взрывного термоядерного устройства под названием «Труба», закрытого после пяти лет напряженной работы, в котором предполагалось инициировать термоядерную реакцию в криогенной смеси дейтерия и трития с помощью ядерного взрыва. Совершенно очевидно, что с точки зрения инициатора термоядерной реакции и плотности термоядерных реагентов ситуация в проекте ИТЭР<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Проект «Прорыв» — направление в ядерной энергетике — предусматривает создание ядерных технологий нового поколения на базе замкнутого ядерного топливного цикла с реакторами на быстрых нейтронах. Проект реализуется в рамках Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года».

<sup>2</sup> Лев Николаевич Максимов — экс-директор Института физико-технических проблем металлургии и специального машиностроения, г. Новосибирск.

хуже. Поэтому при плотности плазмы, характерной для проекта ИТЭР, невозможен нагрев абсолютно прозрачной плазмы изотопов водорода до температур в десятки и сотни кэВ. При таких температурах основная доля энергии сосредоточена в излучении. Поэтому плазма, в которой возможна термоядерная реакция, принципиально должна быть «черной». Но в этом случае стенки магнитных ловушек должны держать излучение, плотность которого достигает плотности металлов. Обычно на это отвечают, что излучение в ловушках сосредоточено только в узком спектральном диапазоне, в котором и осуществляется нагрев плазмы. Но это обстоятельство характерно только для ускорителей моноэнергетических частиц. Но в термодинамически равновесной плазме равновесие между излучением и частицами должно существовать во всем спектральном диапазоне. Именно в этом смысл понятия термодинамического равновесия применительно к высокотемпературной плазме. Например, в микровзрывах полностью моделируются условия, существующие в бомбах, в которых идет термоядерная реакция в термодинамически равновесной плазме в течение сотни наносекунд.

Но в этом направлении термоядерных исследований имеются и другие проблемы, которые, как показали многочисленные исследования в течение примерно 40 лет, нельзя преодолеть. Была установка «Ангара» с электронными, затем протонными пучками. Все это закрыто. Пока продолжают только работы с лазерным излучением. Как известно, при создании термоядерных бомб одной из основных была проблема запираания излучения на время развития реакции. В магнитных ловушках получают не термодинамически равновесную плазму, а ускоренные тем или иным способом моноэнергетические пучки частиц, наподобие ускорителей частиц, но ИТЭР очень неэффективный ускоритель. Поэтому в экспериментах на магнитных ловушках наблюдаются и регистрируются энергии частиц только до 40 кэВ. Но при такой температуре не получается максвелловского спектра энергий частиц, хотя доплеровская методика измерений вполне позволяет это зарегистрировать. Естественно, что при величине кулоновского барьера

$$E_{\text{кул.}} \approx zZ/A^{1/3} \text{ МэВ} \approx 700 \text{ кэВ},$$

где:  $z$ ,  $Z$  — количество протонов в реагирующих ядрах,  $A$  — массовое число трития, синтез ядер дейтерия и трития невозможен даже при учете умень-

шения кулоновского потенциала за счет дебаевского экранирования, поскольку в токамаках дебаевская длина достигает  $10^{-4}$  м, а величина кулоновского барьера определяется размером ядра-мишени, т.е. ядра трития (в нашем случае примерно  $1,5 \times 10^{-15}$  м). Отсутствии максвелловского распределения по энергии в плазме означает отсутствие так называемого «горячего хвоста распределения», за счет которого и идет термоядерная реакция.

2. «Для облегчения возникновения ядерной детонации полезно применение массивных оболочек, замедляющих разлет».

Именно это обстоятельство было одной из причин, по которой термоядерное горючее ( $\text{Li}^6\text{D}$ ) в термоядерных бомбах окружалось оболочкой, изготовленной из обедненного урана и удерживавшей излучение развивающегося термоядерного взрыва в течение нескольких сотен наносекунд просто за счет инерционности тяжелого экрана. После этого никакие экраны или любые другие устройства (например, стенки того же ИТЭРа) не способны противостоять мощному излучению, источником которого является термодинамически равновесная плазма в этих условиях.

В середине 1950-х в ядерном оружии нашло применение и другое устройство, в котором использовалась реакция слияния ядер дейтерия и трития. Это так называемые «нейтронные источники». Они в свое время резко увеличили эффективность ядерного оружия и сделали возможным регулирование мощности ядерного взрыва. Сегодня область применения этих устройств весьма обширна. Смысл этих устройств в том, что ускоренные до энергий порядка сотен кэВ ядра дейтерия бомбардируют мишень, содержащую тритий. Далее происходит слияние этих ядер и выделяется энергия около 18 МэВ. Вот именно в это направление сегодня руководители термоядерных исследований и пытаются перевести идеологию магнитных ловушек.

## 7. Необходимость работ по созданию экологически чистой ядерной энергетики. Основные понятия ядерной релятивистской технологии (ЯРТ)

Кроме обычных реакторов на тепловых нейтронах существует схема ADS (Accelerator Driven Systems). Это ускоритель с энергией  $\sim 1$  ГэВ плюс нейтронопроизводящая ограниченная, как правило, свинцовая мишень, плюс подкритическая активная зона с критичностью  $k_s \sim 0,94 \div 0,98$  [3]. Они осно-

<sup>1</sup> ИТЭР (ITER) (изначально аббр. от англ. International Thermonuclear Experimental Reactor, ИТЭР) — проект международного экспериментального термоядерного реактора. Задача ИТЭР заключается в демонстрации возможности коммерческого использования термоядерного реактора и решении возможных при этом физических и технологических проблем.

ваны на использовании «реакторного» нейтронного спектра и, по сути, представляют собой гибрид подкритического быстрого реактора и внешнего (электроядерного) источника нейтронов. В этих реакторах топливом являются «делящиеся» изотопы уран-235 и плутоний-239. В делительном нейтронном спектре пороговые минорные актиниды «горят» малоэффективно, что обусловлено их высоким (примерно 1 МэВ) порогом деления. Трансмутация долгоживущих продуктов деления из состава ОЯТ крайне плохо замыкается за счет многоступенчатых реакций, которые приводят к появлению новых долгоживущих радиоактивных изотопов.

В настоящее время единственной реальной перспективой кардинального решения проблем современной атомной энергетики представляется использование более жесткого, чем делительный, спектра нейтронов. Коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде из природного урана составляет примерно 0,36. Еще в 1958 г. было показано, что только в глубоко подкритичной системе можно перейти к спектру нейтронов, определяемому внешним источником нейтронов, т.е. получить существенно более жесткий, по сравнению с делительным, спектр. Это позволяет задействовать большой набор конкурирующих между собой неупругих процессов, которые обеспечивают возможность эффективного «сжигания» пороговых минорных актинидов и радионуклидов. Это, собственно, и есть ядерная релятивистская технология (ЯРТ).

В ЯРТ необходимо использовать протоны с энергией значительно большей, чем в ADS, поскольку при малых энергиях протонов значительная доля их энергии теряется на ионизацию вещества мишени. Схема ЯРТ позволит эффективно напрямую «сжигать» для производства энергии базовый материал активной зоны — природный (обедненный) уран, ОЯТ или торий без использования урана-235. Кроме того, схему ЯРТ сегодня можно считать практически единственной реальной схемой ядерной энергетики, в рамках которой возможно использовать запасы тория для решения глобальных энергетических проблем.

В современной ядерной энергетике для деления тяжелых ядер используются нейтроны с энергией примерно до 10 МэВ. Это связано с тем, что освоенные сегодня реакции деления изотопов  $U^{235}$  и  $Pu^{239}$  и реакции синтеза D и T дают только такие нейтроны. Свойства нейтронов большей энергии практически неизвестны. Они имеются только в космических лучах, интенсивность которых крайне мала,

что делает экспериментирование в интересах энергетических задач практически нереальным. Свойства таких нейтронов моделируются только протонами. В области энергий от 10 до примерно 100 МэВ такое моделирование неэффективно, поскольку кулоновский барьер достигает 10–15 МэВ, и взаимодействие сильно искажается «размазанным» в веществе отрицательным зарядом электронов. Моделирование нейтронов протонами эффективно только после энергий 100 МэВ.

В экспериментах, выполненных группой российских ученых в 1998 и 2002 гг. на ускорителях в Дубне и Протвино, была поставлена задача исследовать взаимодействие нейтронов с энергией больше 10 МэВ с тяжелыми ядрами. При этом энергия пучка протонов составляла от 5 до 20 ГэВ. В экспериментах были использованы свинец и висмут. Основные результаты этих экспериментов сводятся к следующему.

1. Активность большой свинцовой мишени с фрагментами висмута была доведена до 8 Р/ч. Через 2 дня она снизилась в 1000 раз, а через 12 суток — до уровня фона. (Тепловыделяющий элемент, облученный нейтронами «низкой» энергии, снижает свою активность на 2 порядка в течение 10 лет.) Основное тепловыделение (до 70%) произошло на периферии мишени. Это может быть связано только с реакцией фрагментации тяжелых ядер с положительным энергетическим выходом.

2. Энерговыведение в мишени на 25% превысило энергию, подведенную к мишени с пучком протонов.

Наиболее важен на данном этапе первый результат. Он показывает, что фрагментация под действием нейтронов «большой» энергии принципиально отличается от обычного деления под действием нейтронов «малой» энергии. Это обстоятельство дает надежду на создание практически безотходной ядерной энергетики.

Получение «энергетически» интересного результата базируется на том обстоятельстве, что, несмотря на сравнительно низкие сечения деления тяжелых ядер (порядка единиц барн<sup>1</sup>), вероятность их деления, в первую очередь ядер тория, в диапазоне энергий нейтронов в десятки МэВ близка к 1. В силу этого обстоятельства термализация нейтронов до того, как они вызовут акт деления, может не произойти, тем более что можно сделать соответствующий запас по энергии нейтронов в процессе их генерации. Кроме того, концентрация делящихся ядер — в отличие от современных реакторов, в которых она составляет 2–5%, — в данном случае

<sup>1</sup> Барн (русское обозначение б, бн; международное b) — внесистемная единица измерения площади, используется в ядерной физике для измерения эффективного сечения ядерных реакций, а также квадрупольного момента. 1 барн численно равен  $10^{-28} \text{ м}^2 = 10^{-24} \text{ см}^2 = 100 \text{ фм}^2$  (примерный размер атомного ядра).

будет равна 100%. Все это требует детальных исследований ядерных процессов в данном диапазоне энергий нейтронов и соответствующих расчетов на их основе. В случае создания новая ядерная энергетика будет обладать всеми свойствами для того, чтобы стать базовой энергетикой.

Наиболее вероятным топливом новой ядерной энергетики будет торий. Для его использования не потребуются предварительных операций, связанных с развитием урановой энергетики, которые необходимы в ныне известном так называемом «ториевом цикле». Не потребуются дорогостоящей топливной промышленности.

Россия обладает колоссальными запасами тория. Например, в 20 км от Сибирского химического комбината находится гигантское месторождение тория. Рядом расположена железная дорога. Имеется инфраструктура. Поэтому российский торий будет самым дешевым в мире.

Первый контур АЭС будет очень простым. Перегрузки топлива не потребуются. Кампания работы реактора без перегрузок может составить 100 и более лет. Исчезнет необходимость в дорогостоящей промышленности по переработке отработавшего ядерного топлива. Все необходимые технологии по созданию высокоэкономичных ускорителей протонов на криогенных магнитах в принципе созданы в рамках программы стратегической оборонной инициативы и аналогичной советской программы.

Новая энергетика не будет производить «бомбовые» материалы и, следовательно, найдет широкое применение во всем мире. Тем самым будут решены сложнейшие международные проблемы. Новая атомная энергетика может стать основой для производства водорода. Это обстоятельство позволит удовлетворить практически все, включая даже пищевые, проблемы человечества за счет ядерной энергии.

Программа создания новой ядерной энергетики состоит из двух этапов.

1. Программа исследований физики взаимодействия нейтронов большой энергии с тяжелыми ядрами. В рамках этой программы должны исследоваться следующие ключевые вопросы: генерация и спектры нейтронов при воздействии на мишень, состоящую из тяжелых ядер, протонами с энергией выше 5 ГэВ;

фрагментация тяжелых ядер, в том числе методами радиохимии, в широком диапазоне больших энергий нейтронов; скорость дезактивации мишеней после различных доз облучения; энерговыделение на мишенях из различных материалов.

2. Создание опытного образца ядерного реактора нового типа. На этом этапе необходимо разработать проект нового реактора по существующим стандартам.

Лучше всего работа может быть реализована в рамках международного проекта. Исследовательский этап целесообразно проводить (в первую очередь из соображений стоимости) на ускорителях Института физики высоких энергий (ИФВЭ, г. Протвино) и Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ, г. Москва). Необходимо участие ВНИИАМ, ИФВЭ, ИТЭФ, Института прикладной математики им. М.В. Келдыша, Института химической физики, Физико-энергетического института (г. Обнинск). Реализация проекта может занять 8–10 лет: 2–3 года на исследовательский этап и 6–8 лет – на создание опытного образца реактора.

Детально программа ЯРТ, ее составные части, оценки необходимого финансирования рассмотрены и одобрены расширенным НТС ВНИИАМ (Научно-техническим советом Всероссийского научно-исследовательского и проектного института атомного машиностроения, Москва) и Международной научной конференцией «Глобальные проблемы безопасности современной энергетике» к 20-летию катастрофы на Чернобыльской АЭС (4-6.04.06., Москва). Фундаментальные основы программы ЯРТ доложены на годичном собрании РАН в 2005 г. В 2009–2011 гг. проведена серия совещаний с участием РАН, МО РФ, ВНИИАМ, РФЯЦ-ВНИИЭФ, на которых концепция ЯРТ была полностью поддержана.

В настоящее время энергетические проблемы в мире резко обострились. В силу всего сказанного альтернативы развертыванию работ по энергетике ЯРТ сегодня просто не существует. Необходимо провести независимую экспертизу специалистов из европейских стран оценить реальные перспективы ядерных релятивистских технологий и создать реальную программу энергетического обеспечения человеческой цивилизации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В.М. Становление атомного комплекса Российской Федерации. Историко-технический анализ конструкционных, технологических и материаловедческих решений М.: МНЭПУ, 2006. 341 с.
2. Кузнецов В.М., Никитин А.К. Ядерные расщепляющиеся материалы. Осло, 2012. 150 с.
3. Кузнецов В.М., Острецов И.Н. Стратегия развития экологически чистой ядерной энергетике // Материалы XIV Международной научно-практической конференции, т.1. Краснодар, 2009. С. 78–81.
4. <http://ria.ru/world/20140409/1003243809.html#ixzz2Yc9IAMV>.