

Ядерные энергетические системы будущего: производство электричества, сжигание отходов

Соединение технологии ускорителей с реакторами дает перспективу производства энергии наряду со сжиганием плутония и радиоактивных отходов

**Виктор
Архипов**

Образование в процессе производства энергии высокорadioактивных отходов ставит перед ядерной энергетикой одну из самых трудных задач. Ее необходимо решать эффективно и безопасно. Хотя и существуют технические решения, включая захоронение в глубокие геологические формации, прогресс в технологии удаления радиоактивных отходов во многих случаях тормозится под влиянием бытующих среди населения сомнений относительно безопасности этой технологии. Одной из основных причин возникновения опасений является длительность существования многих образующихся при делении радиоизотопов, период полураспада которых колеблется от 100 тыс. до миллиона лет. Такого рода опасения могли бы в значительной степени уменьшиться, если бы существовал способ сжигания или разрушения наиболее токсичных долгоживущих радиоактивных отходов в процессе производства энергии.

Недавно появилось новое техническое решение, представляющее собой, скорее, плодотворное развитие прежних идей. Оно предусматривает соединение технологий ускорителя и реактора деления в одну систему, обладающую потенциалом производства электричества в результате деления ядер и/или трансмутирования долгоживущих радиоактивных отходов. В простейшей форме эта концепция системы производства энергии, приводимой в действие ускорителем, связана с использованием нейтронов, получаемых с помощью пучка протонов высокой энергии, для возбуждения бланкетной сборки (речь идет о сборке зоны воспроизводства), содержащей делящийся топливный материал и радиоактивные отходы. Бланкетная сборка подобна реактору в том, что источником энергии служит деление. Однако, в отличие от обычного реактора, она находится в подкритическом состоянии и без ускорителя не может поддерживать цепную реакцию. Топливом для такой

системы могут служить уран, плутоний или торий.

Даже при использовании для разрушения высокоактивных отходов возбуждаемая ускорителем система помогала бы удовлетворению растущих энергетических потребностей благодаря производству электричества — наиболее удобной и универсальной формы энергии. В течение ближайших двух десятилетий спрос на все источники энергии будет расти, хотя бы только для удовлетворения нужд растущего мирового населения, численность которого, по расчетам ООН, к 2025 г. приблизится к 8,5 млрд.

Трансмутация радиоактивных отходов

Экологически безопасное обращение с радиоактивными отходами является серьезной проблемой, стоящей перед всеми развивающимися ядерную промышленность странами. Во многих из них она приобрела политическую значимость, поскольку привлекает пристальное критическое внимание населения.

В концепции замкнутого ядерного топливного цикла традиционно учитывалась трансмутация (сгорание) только плутония и повторно используемого урана, тогда как второстепенные актиниды (нептуний, америций, кюрий) подлежали окончательному геологическому захоронению. Но со временем приходит новое понимание: сокращение количества актинидов снизило бы жесткость требований к хранилищам, предназначенным для окончательного захоронения, что сделало бы их не столь дорогостоящими.

Нейтронная трансмутация долгоживущих радиоактивных второстепенных актинидов с помощью процесса деления — с сопутствующим производством энергии и одновременным превращением их в короткоживущие нуклиды — активно анализируется научно-техническим сообществом.

Г-н Архипов является консультантом Секции разработок ядерных энергетических технологий в Отделе ядерной энергетики и топливного цикла МАГАТЭ.

Предлагается также нейтронная трансмутация отдельных долгоживущих продуктов деления.

Было предложено несколько возможных вариантов трансмутации долгоживущих нуклидов с помощью ядерных реакций. Вначале наилучшим выбором представлялось использование ядерных реакторов. Однако в последнее время вновь появился интерес к так называемым возбуждаемым ускорителем системам (ВУС) — технологии, которая представляется многообещающей.

Этот интерес вызван необходимостью решения вопроса о том, что делать с избыточным количеством плутония, накопленного в арсеналах ядерного оружия, а также в значительно больших и продолжающих расти инвентарных количествах отработавшего топлива коммерческих ядерных установок. Существуют серьезные политические опасения в связи с возможностью использования плутония в несанкционированных целях и выбросами этого высокотоксичного материала в окружающую среду. Рассматриваются многие варианты удаления этого плутония, и один из них — сжечь его, используя технологию ВУС. Такое решение дало бы возможность дополнительно получить в больших количествах электроэнергию и одновременно уничтожить плутоний, что выглядит более привлекательной альтернативой по сравнению с захоронением на многие тысячи лет.

Возможности возбуждаемой ускорителем системы могут быть также применены для одновременного сжигания долгоживущих продуктов деления и актинидов в отходах от действующих коммерческих ядерных энергетических реакторов. Цель сжигания этих продуктов деления состоит в том, чтобы разрушить долгоживущие изотопы, радиоактивность которых в силу их мобильности составляла бы наибольшую часть доз облучения из хранилища, а именно технеций-99, йод-129 и цезий-135. Эти три изотопа, составляя по весу около 5% общей массы образующихся в процессе производства энергии продуктов деления, являются главной причиной возможных долгосрочных рисков, связанных с геологическим захоронением. Если эти три изотопа разрушены внутри системы, остальные короткоживущие и стабильные продукты деления можно изолировать в инженерно оборудованном хранилище, в том числе даже на площадке АЭС.

Максимальное выгорание продуктов деления требует их обработки на месте. Путем оптимизации системы возбуждаемая ускорителем мишень/бланкетная сборка для выгорания можно значительно уменьшить объем и период полураспада потока отходов, что позволило бы смягчить требования к их долгосрочному захоронению и безопасному удалению. Даже в такой системе, где главной функцией является сжигание радиоактивных отходов, можно рассчитывать на производство достаточного количества электроэнергии для компенсации капитальных и эксплуатационных затрат на установку.

Эти цели похвальны, однако следует учитывать, что разработка такой технологии все еще требует проведения серьезных НИОКР. Предстоит доказать техническую осуществимость и особенно экономическую и радиологическую рациональность трансмутаций. Поэтому следует тщательно сравнить и оценить аргументы за и против фракционирования и трансмутации радиоактивных отходов.

Соединение производства энергии и трансмутации

Идея использования ускорителей для различных применений ядерной энергии не нова. Она была выдвинута еще в конце 40-х гг. изобретателем циклотрона Э. Лоуренсом. В 50-х гг. он поддержал разработку ускорителя для испытания материалов в Ливерморе с целью получения интенсивных потоков нейтронов для производства плутония. В канадской лаборатории Чок-Ривер начались интенсивные исследования систем на базе ускорителей для производства ядерного топлива тяжеловодных реакторов. В конце 70-х — начале 80-х гг. ученые Брукхейвенской национальной лаборатории также активно поддерживали варианты решений на базе ускорителей. За последние пять лет ученые Лос-Аламосской национальной лаборатории провели новый анализ технологии на основе ускорителей в свете последних достижений техники и с учетом мировых энергетических перспектив.

Совсем недавно лауреат Нобелевской премии и бывший Генеральный директор Европейского центра ядерных исследований (ЦЕРН) Карло Руббиниа предложил и активно поддерживает создание ВУС для производства энергии на основе торий-уранового цикла.

Существуют два типа ускорителей для возбуждения этой системы энергией примерно 1 ГэВ при среднем токе в диапазоне от 10 до 100 мА. Первый вариант предусматривает использование линейного ускорителя, второй — циклотрона, имеющего преимущество большей компактности. Оба варианта могут обеспечить необходимую энергию, но требуют технологических разработок для достижения нужной интенсивности пучка. Из-за трудности обеспечить адекватную стабильность пучка циклотрон имеет ограничения по току пучка от 10 до 15 мА, тогда как при использовании линейного ускорителя прогнозируется возможность достичь в пучке тока 100—200 мА. Линейные ускорители уже являются источником получения таких токов в импульсном режиме, однако, чтобы добиться почти постоянного действия при самых высоких токах, требуются дополнительные серьезные инженерные разработки. Система, подающая на бланкетную сборку 15 мА протонов и 800 МэВ, может обеспечить выход 200 МВт электроэнергии. Для такого уровня мощности подходит циклотрон. Используя линейный ускоритель

с высокими токами, можно возбудить систему производства энергии мощностью 1200 МВт (эл.). В любом случае ожидается, что для запуска ускорителя потребуется около 15—20% всей электрической энергии.

В нескольких странах и в ряде международных организаций в настоящее время рассматриваются различные технические варианты трансмутации и производства энергии с использованием ВУС. Ряд схем ВУС рассматривается в рамках проекта ОМЕГА в Японии (выбор вариантов дополнительного использования потенциала актинидов), в Соединенных Штатах (в Лос-Аламосской и Брукхейвенской национальных лабораториях), во Франции (Комиссией по атомной энергии — КАЭ), в Российской Федерации, в ЦЕРН, в Агентстве по ядерной энергии (АЯЭ) Организации экономического сотрудничества и развития и в Европейской комиссии (ЕК).

Концепции ВУС можно классифицировать по их физическим свойствам и конечным целям применения. Классификация основана на спектре энергии нейтронов, форме топлива (твердое, жидкое), топливном цикле и типе охладителя/замедлителя и назначениях системы. Системы ВУС, подобно реакторам, могут быть предназначены для работы в двух различных режимах нейтронного спектра — на быстрых или на тепловых нейтронах. В ЦЕРН также предпринимаются попытки создать систему, основанную на резонансах нейтронных сечений, в режиме, который может быть определен как режим “резонансного нейтрона”. Как быстрые, так и тепловые системы рассматриваются применительно к твердым и жидким топливам. Было предложено даже квазижидкое топливо на базе концепции корпускулярного топлива (засыпка из шаровых теплообразующих элементов), разработанной в Брукхейвене.

Как говорилось выше, назначение некоторых ВУС заключается в трансмутации существующих компонентов отработавшего топлива ядерных реакторов, в основном плутония и второстепенных актинидов, с одновременным производством энергии или без него. Другие системы предназначены для использования ториевого топливного цикла в целях производства энергии. Большинство концепций основаны на применении линейных ускорителей. Однако группа ЦЕРН и исследователи в Брукхейвене предлагают применять протонный циклотрон.

Предложенная в Лос-Аламосе возбуждаемая ускорителем система производства энергии включает линейный ускоритель с протонным пучком высокой энергии, мишень из тяжелого металла (свинец или свинец—висмут) и жидкое топливо. Жидкое топливо предпочтительнее, так как позволяет обойтись без процессов изготовления твердого топлива и обращения с топливными партиями, в то же время давая возможность постоянной экстракции значительной части продуктов деления в ходе работы системы. Благодаря их удалению достигается как улучшение экономических пока-

зателей использования топлива, так и уничтожение долгоживущего компонента продуктов деления. Вариант с расплавом соли был выбран потому, что он работает при низком давлении, имеет более простые механические структуры, допускает меньшие потери от поглощения нейтронов и использует меньшее инвентарное количество жидкого топлива.

Карло Руббин и сотрудники ЦЕРН предложили возбуждаемую ускорителем подкритическую ядерную систему на быстрых нейтронах. Топливные элементы имеют твердую форму и состоят из топливных стержней, окруженных оболочкой. Номинально система предназначена для тория/урана-233, но может работать и на плутонии (либо военного, либо реакторного класса), а также способна расщеплять более тяжелые актиниды — америций и кюрий. Система содержит ряд элементов пассивной безопасности, основанных на ее физических свойствах.

В течение последних двух десятилетий проектными исследованиями трансмутационных систем занимается Японский научно-исследовательский институт атомной энергии (JAERI). Изучаются два вида концепций ВУС: система твердая мишень/активная зона и система мишень/активная зона из расплавленной соли. Концепция реактора на расплавленной соли в соединении с ускорителем изучается в нескольких японских университетах. JAERI готов приступить к осуществлению проекта по нейтронной физике, который нацелен на внедрение в XXI в. новейших научно-технических разработок с использованием нейтронов в области фундаментальных наук и ядерных технологий. Важной частью проекта являются изучение возбуждаемых ускорителями трансмутационных систем и разработка ускорителя с интенсивным пучком протонов.

По нескольким аспектам технологии и физики ВУС работали в последние годы различные лаборатории КАЭ Франции. В 1995 г. было решено приступить к осуществлению ограниченной программы по экспериментальному обоснованию основных компонентов, присущих ВУС.

Изучением аспектов технологии и физики ВУС занимаются несколько групп в научных центрах Российской Федерации. Они рассматривают различные концепции таких систем с использованием разных структур и материалов мишени иblankета. Ряд исследований по фракционированию и трансмутации отходов, так называемые конверсионные проекты, получают финансовую поддержку международных учреждений, главным образом в рамках Международного научно-технического центра.

В АЯЭ осуществляется широкая международная программа исследований по проблемам, связанным с трансмутацией и разделением продуктов деления и актинидов. Комитет по ядерному развитию АЯЭ недавно создал экспертную группу системных исследований по фракционированию и трансмутации актинидов и продуктов де-

ления. Комитет по ядерным наукам АЯЭ осуществляет ряд совместных проектов, охватывающих научные и физические аспекты различных концепций трансмутации.

Европейская комиссия координирует проекты государств-членов на основе разделения расходов и осуществляет исследования по второстепенным актинидам, топливу и фракционированию в Европейском институте трансурановых элементов, который посвятил этой работе последние 30 лет. Изучение топлива, содержащего второстепенные актиниды, привело к серии экспериментов по облучению, ряд которых уже завершен. В рамках другой программы ЕК основное внимание уделяется изучению воздействия базирующихся на ускорителях технологий на безопасность ядерного деления с целью координации усилий по созданию в Европе научно-технической базы для совместных проектов.

Роль деятельности МАГАТЭ в области разработки ВУС

Деятельность МАГАТЭ в этой области осуществляется в рамках программы по новым ядерным энергетическим системам для производства энергии и трансмутации. Цель состоит в обеспечении глобального форума для технического рассмотрения и обсуждения программ, проектов и тем по разработке и внедрению ядерной энергии, включая ВУС. Основное внимание уделяется составлению и распространению докладов о состоянии дел и технической информации, а также поддержке координированных исследований, в том числе:

Подготовка и публикация доклада о состоянии дел по ВУС. Эта работа является результатом технических дискуссий в рамках специальной научной программы "Использование ускорителей высоких энергий для трансмутации актинидов и производства энергии", состоявшихся одновременно с сессией Генеральной конференции МАГАТЭ в Вене в 1994 г. Доклад предназначен для использования лицами, отвечающими за планирование и принятие решений, и всеми, кто заинтересован в разработке ВУС, и представляет собой обзор ведущихся разработок и различных концепций на разной стадии реализации, а также типичных тенденций в развитии системы и оценок потенциала этой системы для производства энергии, сжигания плутония и трансмутации радиоактивных отходов. Он включает материалы, представленные экспертами из шести стран и двух международных организаций, а также резюме деятельности во многих областях развития технологий ВУС.

Доклад о состоянии дел по топливному циклу на базе тория. В докладе будет обобщена информация, полученная за последние шесть лет, и указаны области, требующие дальнейших исследова-

ний. В него войдут сообщения отдельных стран и технических групп и будут изложены их концепции.

Программа координированных исследований. Программа сосредоточена на использовании топливного цикла на базе тория в ВУС для сжигания плутония и уменьшения токсичности отходов долгосрочного захоронения. Первая стадия охватывает опорные параметры и расчеты по нейтронной физике ВУС с целью достичь консенсуса по методам расчета и соответствующим ядерным данным.

Заседание Технического комитета по осуществимости и мотивации гибридных концепций производства ядерной энергии и трансмутации. В сентябре 1997 г. соберутся технические эксперты для рассмотрения и обсуждения преимуществ и недостатков гибридных концепций применительно к текущему состоянию и будущим потенциальным направлениям мирового развития ядерной энергетики, чтобы подготовить варианты выбора и рекомендации в этой области для государств — членов МАГАТЭ.

Задачи и возможности

Прежде чем можно будет продемонстрировать потенциал концепции ВУС, предстоит изучить многие технические и инженерные вопросы и дать на них ответы. Будущая работа потребует более тесного международного сотрудничества для совместного использования опыта и ресурсов.

Во многих отношениях возбуждаемые ускорителем системы заслуживают дальнейшей разработки. Благодаря производству электричества они способны внести вклад в удовлетворение растущих мировых энергетических потребностей, а путем сжигания плутония и высокоактивных отходов могут способствовать целям защиты окружающей среды и безопасного обращения с радиоактивными отходами. Некоторые типы разрабатываемых в настоящее время ВУС могут производить энергию из такого распространенного элемента, как торий, в безопасной подкритической бланкетной сборке при минимальном потоке ядерных отходов. Кроме того, в перспективе — разработка систем для сжигания оружейного плутония и отработавшего ядерного топлива коммерческих АЭС, включая его основные продукты деления.

В настоящее время ряд национальных и региональных научных институтов и лабораторий во всем мире заняты исследованиями и разработками ВУС. На глобальном уровне программы МАГАТЭ в этой области помогают обеспечивать обмен информацией и сотрудничество в исследованиях по конкретным темам. Вся эта работа свидетельствует о росте интереса к технологии ВУС как практическому средству содействия достижению глобальных целей производства энергии и защиты окружающей среды. □