

## Электроядерные установки

В. Ф. КОЛЕСОВ

### 1. Проблемы ядерной энергетики

Начиная с середины XX века, энергия деления ядер стала важным фактором мировой цивилизации. К 1975 г. суммарная мощность атомных электростанций (АЭС) в мире составила 80 ГВт. В те годы предполагали, что к началу XXI века АЭС займут лидирующее положение в производстве электроэнергии. Однако в последующие десятилетия темпы строительства новых электростанций вопреки ожиданиям резко снизились. В аргументации противников ядерной энергетики делался упор на то, что ядерные реакторы не свободны от возможных взрывных аварий и функционирование их сопряжено с накоплением больших количеств радиоактивных отходов, в том числе и с очень большими периодами полураспада. Уже тогда говорилось о повышенном риске распространения делящихся материалов и ядерного оружия. На снижение темпов строительства новых АЭС повлияло также осознание ограниченности ядерного топлива, поскольку в действующих реакторах сжигается преимущественно  $^{235}\text{U}$ , содержание которого в природном уране составляет лишь 0,7 %.

Однако после двух десятилетий стагнации намечились пути преодоления указанных проблем и рисков. С разработкой более совершенных реакторов и более трезвой оценкой ресурса ядерного топлива ядерная энергетика постепенно вновь обрела твердую опору. Под давлением факторов парникового эффекта и близкого исчерпания запасов органического топлива период стагнации сменился периодом хотя и умеренного, но довольно устойчивого роста количества АЭС и производимой ими электроэнергии (рис. 1).

Сказанное, однако, не означает, что провозглашенные лозунги об угрозах человечеству со стороны ядерной энергетики оказались несостоятельными или уже преодолены. Эти лозунги не утратили своей актуальности. Остался в силе и тезис

об опасности отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Временные хранилища радиоактивных отходов предназначены для использования в течение десятков или сотен лет. Но отходы содержат и радиоактивные ядра, преимущественно ядра Pu и младших актинидов (МА) Np, Am, Cm, с периодами полураспада в десятки и сотни тысяч лет.

В целях избавления от долгоживущих радионуклидов должны применяться или окончательное их захоронение в глубинных слоях горных пород, или захоронение в таком же хранилище после переработки с помощью трансмутации. Трансмутация – это преобразование долгоживущих радионуклидов через посредство ядерных реакций в стабильные или короткоживущие ядра. При использовании трансмутации проблема долговременного хранения отходов, по существу, снимается. Например, при 99 %-ом извлечении из отходов Np, Am и Cm время достижения ядерными отходами уровня активности исходного урана снижается с 200 000 лет до 400 лет (рис. 2). Трансмутация плутония и младших актинидов осуществляется, главным образом, за счет реакций деления.

Таким образом, в настоящее время трансмутация рассматривается как единственное

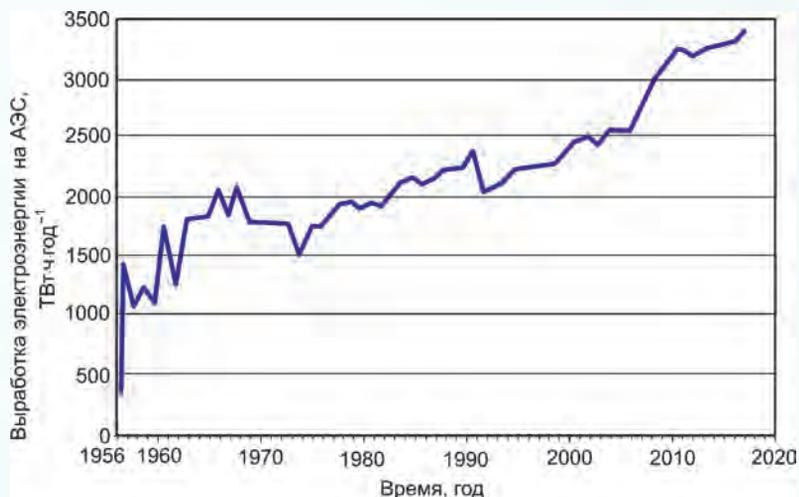


Рис. 1. Мировая выработка электроэнергии на АЭС

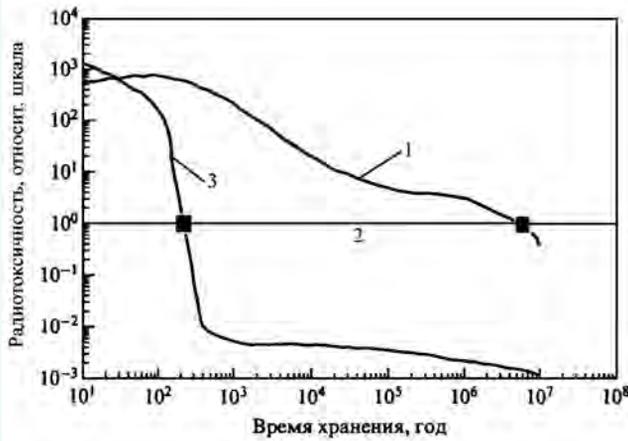


Рис. 2. Зависимость от времени радиотоксичности двух основных компонентов ядерных отходов для ОЯТ реактора с водой под давлением: 1 — актиниды; 2 — исходная урановая руда; 3 — продукты деления

средство избавления от долгоживущей радиоактивности. Функцию трансмутатора могут осуществлять критические быстрые реакторы. Но в качестве трансмутаторов МА критическим реакторам свойственны существенные недостатки, поскольку введение в их активные зоны значительного количества МА резко ухудшает безопасность установок. В свете сказанного, в аспекте трансмутации долгоживущих МА особую значимость приобретают электроядерные установки (ЭЛЯУ), которым посвящена монография

автора (Электроядерные установки и проблемы ядерной энергетики. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013).

## 2. Электроядерные установки

ЭЛЯУ представляет собой комплекс ускорителя протонов, подкритического ядерного реактора, называемого бланкетом, и генерирующей нейтроны мишени. Ускоритель в комплексе генерирует пучок протонов энергией  $\sim 1$  ГэВ, мощностью  $\sim 10$  МВт. Пучок протонов бомбардирует мишень и генерирует нейтроны в результате ядерных реакций расщепления. Каждый протон производит 20–30 нейтронов. Поток нейтронов из мишени поступает в бланкет и, вызывая деления в уране или в ядрах трансурановых элементов, размножается и генерирует энергию (рис. 3). ЭЛЯУ трактуются как новый класс ядерно-энергетических установок XXI века.

Преимущества ЭЛЯУ в сравнении с обычными критическими реакторами заключаются:

- в полной свободе от взрывных аварий;
- в более оперативном управлении цепной реакцией путем быстрого изменения мощности ускорителя;
- в большей доле избыточных нейтронов.

Если в критических реакторах масса вводимых в активную зону плутония и младших актинидов не должна превышать 3–5 %, то ЭЛЯУ, поскольку они заведомо глубоко подкритичны,

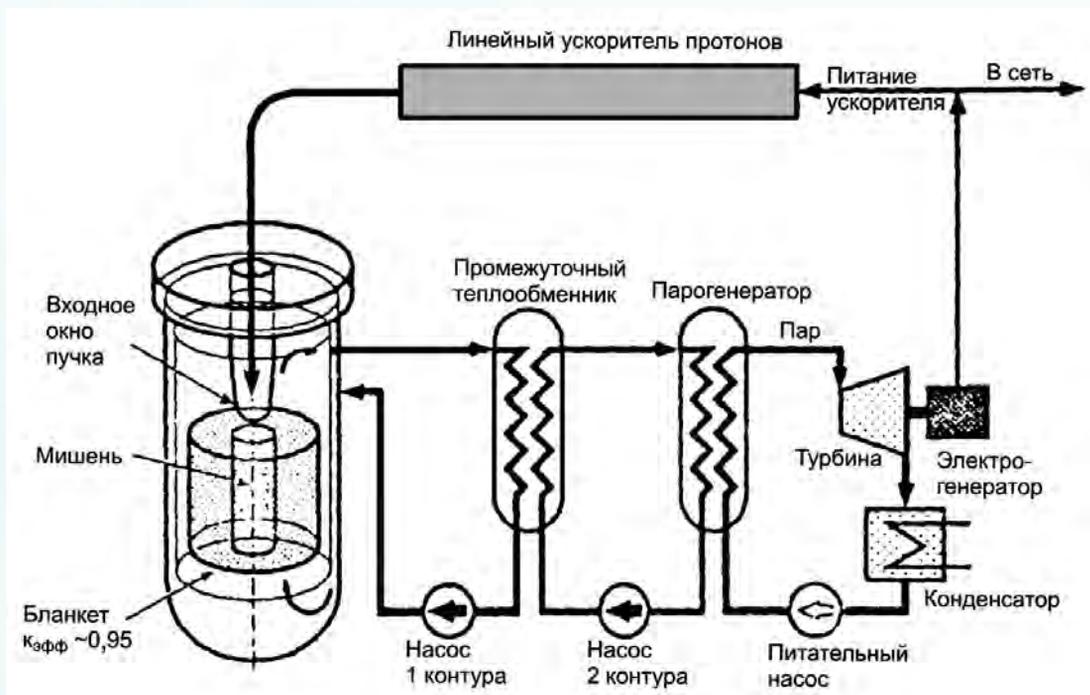


Рис. 3. Схематическое представление электроядерной установки

могут успешно работать целиком на плутонии и младших актинидах и эффективно выжигать их.

Можно указать на три основных назначения ЭЛЯУ:

- 1) трансмутация ядерных отходов с попутным производством энергии;
- 2) производство энергии;
- 3) производство делящихся материалов.

На современном этапе развития ядерной энергетики использование ЭЛЯУ для трансмутации долгоживущих младших актинидов считается приоритетным.

Идея электроядерных установок возникла в конце 1940-х гг. Первым специалистом, основательно разрабатывавшим эту идею, называют канадского ученого У. Люиса. К началу 1990-х гг. во многих странах возникла новая волна интереса к ЭЛЯУ. К этому времени стала более настоятельной проблема ликвидации радиоактивных отходов.

Пионерами возрождения интереса к ЭЛЯУ были К. Фурукава (Япония), Ч. Боуман (США) и К. Руббиа (Европа, ЦЕРН). В течение 1990-х гг. и первого десятилетия текущего столетия работы по ЭЛЯУ велись с большой интенсивностью не только в названных странах и организациях, но и в России, Франции, Италии, Бельгии и ряде других стран. Наиболее масштабные и многообещающие разработки типа программы АТW (ЛАНЛ, США) и проекта «Усилитель энергии» (ЦЕРН, Швейцария), правда, не были реализованы, но более локальные программы и проекты по созданию экспериментальных макетов ЭЛЯУ, их бланкетов и высоконапряженных мишеней, по развитию расчетных методов завершены или ведутся вполне успешно.

В 1990-х гг. исследования по разработке ЭЛЯУ наиболее интенсивно велись в Лос-Аламосской национальной лаборатории США под руководством Чарльза Боумана. Эти исследования базировались на действующем в ЛАНЛ самом мощном в те годы линейном ускорителе протонов и проектом тепловом бланкете на расплаве фторидных солей  $\text{LiF}$ ,  $\text{BeF}_2$  или  $\text{NaF-ZrF}_4$ . Нейтроны расщепления должны были генерироваться пучком протонов в свинцовой или ториевой мишени, размещенной в центре активной зоны. Коэффициент размножения нейтронов  $k_{\text{эф}}$  в бланкете ЭЛЯУ и тепловая мощность ЭЛЯУ принимались равными 0,96 и 750 МВт соответственно.

По замыслу, основное назначение ЭЛЯУ ЛАНЛ заключалось в сжигании оружейного плутония, а также плутония и младших акти-

нидов из отходов ядерной энергетики. Соответствующая этим исследованиям программа получила название АТW (Accelerator transmutation of waste).

К разработке проекта АТW широко привлекались специалисты многих организаций США и других стран. В частности, значительный вклад в разработку проекта внесли исследования, выполненные в России по линии контрактов с Международным научно-техническим центром.

Топливом в предложенной К. Руббиа ЭЛЯУ под названием «Усилитель энергии» (УЭ) является торий. Торий полностью сжигается в УЭ в итоге ряда циклов. Сжигаются и актиниды, генерируемые при его работе. По расходу природного ядерного материала УЭ примерно в 250 раз эффективнее нынешних легководных реакторов. Охлаждение УЭ производится в результате естественной конвекции расплавленного свинца.

Концепция «Усилителя энергии» К. Руббиа и возглавляемой им группы получила широкую известность в мире. Имеется много убежденных ее приверженцев. Концепция УЭ вызвала к жизни ряд больших экспериментальных программ, имеющих целью подтверждение научной и технической осуществимости ЭЛЯУ (программы экспериментов FEAT, MUSE, TRADE и др.).

### 3. Другие разработки ЭЛЯУ

Министры Франции, Италии и Испании по вопросам ядерных исследований создали техническую рабочую группу, которая обосновала необходимость проектирования и испытания в действии достаточно мощной установки XADS. По замыслу, установка XADS, будучи мощной предшественницей индустриальных ЭЛЯУ, должна была осветить критические аспекты таких систем и, прежде всего, продемонстрировать реалистичность самой идеи их создания. Предполагалось, что в процессе выполнения указанной программы будут разработаны проекты трех установок и развернуты работы по реализации этих проектов.

Из трех реакторов проекта XADS на сегодняшний день наиболее обоснована и конструктивно разработана установка MYRRHA ЭЛЯУ тепловой мощностью 50 МВт, охлаждаемая свинцово-висмутовой эвтектикой. Работы по этой установке проводятся в Бельгийском центре ядерных исследований (SCK CEN, г. Мол). Согласно планам, ввод MYRRHA в эксплуатацию должен состояться в 2020 г.

Большой активностью в области трансмутации и ЭЛЯУ отмечены позиции Франции и, до недавнего времени, Японии – стран с широким внедрением ядерной энергии в экономику. Во Франции эти исследования проводятся в рамках программы SPIN, в Японии – программы OMEGA.

Во Франции в качестве стартового варианта таких работ на базе реактора MASURCA была собрана модель ЭЛЯУ нулевой мощности. Во Франции же разработан концептуальный проект газоохлаждаемой ЭЛЯУ XADS.

В Японии выдвинут проект ЭЛЯУ с бассейновым бланкетом на быстрых нейтронах, загружаемым топливом в виде моонитридов младших актинидов и плутония. Состав топлива по весу составляет 60 % MA + 40 % Pu, начальное содержание MA в активной зоне равно 2,5 т. За год эта ЭЛЯУ способна выжигать через посредство реакции деления 250 кг MA. Это количество MA равно их наработке в течение года десятью АЭС с легководными реакторами электрической мощностью 1 ГВт.

Работы в области ЭЛЯУ и трансмутации долгоживущих MA и ПД проводятся также в Германии, Испании, России и ряде других стран. В Германии такие исследования ведутся, главным образом, в Исследовательском центре Карлсруэ. Совместным предприятием Исследовательского центра Карлсруэ и ряда ядерных центров Европы и Азии явилась разработка мишени MEGAPIE, предназначенной для осуществления реакций расщепления при мощности пучка протонов 1 МВт. Работы в рамках этого проекта велись с мая 1992 г. и к 2012 г. полностью завершены.

Хотя государственной программы разработки электроядерных установок в России нет, тем не менее, в ряде институтов и объединениях институтов России такие работы ведутся. Эскизно-концептуальные проекты различных вариантов электроядерных установок стали появляться в России, начиная уже с 1960-х гг. Выдвигались они энтузиастами, преимущественно в институтах, располагавших протонными ускорителями. Позднее стали разрабатываться уже настоящие проекты, и не только концептуальные, но и материально прописанные.

В НИЦ «Курчатовский институт» был предложен ряд схем ЭЛЯУ с бланкетами на основе расплавленных фторидов. Основное внимание при этом уделено оценке предельно достижимых характеристик расплавно-солевых бланкетов с быстрым спектром нейтронов.

В Физико-энергетическом институте (г. Обнинск) в 2003 г. был создан проект опытно-промышленного прототипа ЭЛЯУ, предназначенного для трансмутации младших актинидов. Прототипом мишени для установки был намечен мишенный комплекс МК-1 мощностью 1 МВт, разработанный в ФЭИ по контракту с ЛАНЛ США.

В Институте теоретической и экспериментальной физики с участием Опытного-конструкторского бюро машиностроения, в Институте ядерных исследований РАН и Объединенном институте ядерных исследований были разработаны проекты ряда лабораторных вариантов ЭЛЯУ.

Как уже говорилось, идея электроядерных установок возникла еще в начале 1950-х гг. Тем не менее, реализованных на практике полномасштабных ЭЛЯУ до сих пор нет. Одно из основных препятствий на пути их реализации слишком высокие требования к мощности ускорителя протонов и мишени.

В 1990-х гг. во ВНИИЭФ было показано, что указанные жесткие требования могут быть существенно ослаблены с помощью использования концепции каскадных реакторов, т. е. двухсекционных реакторов с односторонней нейтронной связью секций. Как оказалось, реакторы каскадного типа дают возможность во много раз снижать мощность ускорителя и соответственно мишени.

Первоначально идея использования каскадных реакторов возникла в связи с поиском конструкций импульсных реакторов с предельно малой длительностью импульсов. В 1979 г. во ВНИИЭФ было показано, что этого, а именно многократного укорочения длительности нейтронных импульсов, можно достигать в реакторах каскадного типа. Одновременно был предложен способ осуществления односторонней нейтронной связи секций путем использования в одной из секций нептуния – порогового делящегося вещества, на который автором и А. А. Малинкиным было получено авторское свидетельство «Двухкаскадный умножитель нейтронов» № 786619 СССР.

В последующие годы в России и за рубежом появился целый ряд проектов каскадных импульсных реакторов и ЭЛЯУ, но мощных установок этого типа пока нет.

#### 4. Эксперименты на лабораторных образцах ЭЛЯУ

За последние два десятилетия выполнены масштабные эксперименты на лабораторных об-

разцах ЭЛЯУ. Эти работы проводились институтами разных стран или кооперациями институтов при участии больших контингентов научных и инженерных специалистов, с привлечением значительных материальных и финансовых средств. В результате была получена ценная экспериментальная информация, подтверждающая теоретические заключения относительно принципов действия и управления ЭЛЯУ и эффективности этих установок в качестве трансмутаторов плутония и МА. В этой связи широко известны эксперимент FEAT по определению выхода энергии в мишенях (ЦЕРН, Швейцария), программа экспериментов MUSE (Исследовательский центр Кадараш, Франция), программа экспериментов TRADE (ENEA, Италия), эксперименты на лабораторных устройствах «Энергия плюс трансмутация» и «ГАММА-2» (ОИЯИ, г. Дубна, Россия), эксперименты на установке ЯЛИНА (Объединенный институт ядерно-энергетических исследований, г. Минск, Белоруссия).

Существенно отметить, что до 2003 г. за единичными исключениями работы по каскадным системам были расчетно-теоретическими или проектными. Впервые систематическое экспериментальное исследование свойств каскадных реакторов, использующих пороговое делящееся вещество, проведено во ВНИИЭФ в 2003–2004 гг. Были выполнены три серии экспериментов на подкритических уран-нептуниевых каскадных и соответствующих им односекционных реакторных моделях (Завьялов Н. В., Колесов В. Ф., Иванин И. А., Илькаев Р. И. и др. Эксперименты на моделях реакторов каскадного типа. – Атомная энергия, 2006, т. 100, вып. 2). Эти эксперименты подтвердили теоретические заключения о положительных свойствах каскадных бланкетов и эффективности нептуния в качестве средства достижения односторонней связи секций.

## 5. Отработка протонных ускорителей и мишеней

Уже на начальном этапе разработки ускорителей было выяснено, что эти установки могут найти применение в масштабном производстве нейтронов. Для этой цели предполагалось использовать каскад ядерных реакций расщепления (скальвания), инициированный в мишени заряженными частицами, например, протонами. Первоначальный интерес к электроядерному методу производства нейтронов был связан с проблемой наработки  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{233}\text{U}$  из  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ . В настоящее время круг возможных приложе-

ний реакции расщепления значительно расширен и включает в себя создание мощных исследовательских источников нейтронов, ЭЛЯУ и трансмутацию младших актинидов.

Применительно к ЭЛЯУ и трансмутации МА наибольший интерес представляют протоны в диапазоне энергий 0,8–1,5 ГэВ. Выход нейтронов при указанных энергиях в зависимости от материала мишени достигает уровня  $(2-5) \cdot 10^{11}$  Дж<sup>-1</sup>. Реализация полномасштабной ЭЛЯУ, предназначенной для трансмутации МА, требует пучки протонов с током порядка или выше 10 мА.

Процесс рождения нейтронов в мишенях изучается в течение уже более полувека. Было выполнено очень большое число экспериментов на пучках протонов с энергией вплоть до 70 ГэВ. Наиболее систематически такие исследования проводились в ОИЯИ и ИТЭФ (Россия), LANL и BNL (США), Сакле и GANIL (Франция), CERN и PSI (Швейцария), КЕК (Япония) и Юлихе (Германия). Аналогичные работы интенсивно ведутся и в настоящее время. Как и ранее, основной акцент при этом падает на результаты измерения выходов нейтронов, их пространственно-энергетических и угловых распределений, зависимости этих характеристик от энергии и типа бомбардирующих частиц, а также от типа и размеров мишени.

Очень важным этапом на пути решения указанных вопросов явилась разработка и практическая реализация мощной мишени MEGAPIE.

В завершение статьи отмечу, что в разработку темы электроядерных установок внесли вклад многие ученые России. Хорошо известны в этой области работы В. С. Барашенкова, Г. В. Киселева, А. С. Герасимова, В. Г. Василькова, В. Н. Швецова, А. М. Козодаева, Н. В. Лазарева, Н. В. Завьялова, И. А. Иванина, В. Х. Хоружего, С. В. Керновского, В. М. Новикова, Е. А. Земскова, Л. И. Пономарева и других ученых.

**КОЛЕСОВ Владимир Федорович** –  
главный научный сотрудник ИЯРФ РФЯЦ-  
ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук