



ИНФОРМАЦИОННЫЙ БЮЛЛЕТЕНЬ

№ 1(9)

2012

СЕРИЯ: АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА В ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРАХ

Современная наука рассматривает ядерную энергетику как один из основных источников энергообеспечения человечества на долгосрочную перспективу. Это станет возможным, если будут решены ключевые проблемы отрасли, к которым относятся, в первую очередь, создание предпосылок для овладения неисчерпаемыми ресурсами ядерного топлива и обеспечение безопасности и экономичности обращения с делящимися материалами.

В основе топливообеспечения современной мировой ядерной энергетики лежат ресурсы природного урана, при этом используется лишь незначительная их часть (~1%), в основном изотоп уран-235. Подавляющая часть добываемого природного урана накапливается в виде изотопа уран-238 в отвалах обогатительных и рудодобывающих производств, частично в отработавшем ядерном топливе. Использование в полном объеме энергетического потенциала природного ядерного топлива предполагает вовлечение в соответствующие ядерные топливные циклы при широкомасштабном развитии ядерной энергетики будущего огромных запасов урана-238, а впоследствии – и тория -232.

Усилия по оптимизации ресурсосбережения и безопасности в современной мировой ядерной энергетике должны находиться в рамках концепции нераспространения ядерного оружия. В настоящее время эти усилия направлены на поиск эффективных и безопасных технологий переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), выделение при переработке делящихся изотопов урана и плутония и вовлечение этих нуклидов, а также высвобождаемых в процессе разоружения оружейных делящихся материалов – плутония-239 и высокообогащенного урана-235 в топливный цикл современных энергетических ядерных реакторов.

Утилизация оружейного высокообогащенного урана (обогащение по урану-235 не менее 92%) осуществляется путем получения из него стандартного топлива энергетических реакторов за счет разбавления обедненным или естественным ураном.

Особые проблемы создает искусственный нуклид плутоний-239, который оказался наиболее подходящим элементом (в концентрации около 95%) для создания ядерного оружия. Изотопы плутония образуются в любом ядерном реакторе, работающем на урановом топливе. С целью получения плутония-239 (из урана-238) для создания на его основе ядерного оружия в 40-е годы возникла и получила реальное осуществление идея переработки ОЯТ. Оружейный плутоний получали при переработке облученного уранового топлива с низким выгоранием, находившегося в специально разработанных реакторах в течение лишь нескольких месяцев, после небольшого времени охлаждения. Примерный изотопный состав нарабатываемого в таком режиме плутония – (95% ^{239}Pu + 5% ^{240}Pu). За время гонки вооружений было наработано его значительное количество.

На современном этапе, в соответствии с международными договоренностями, извлеченные в процессе разоружения из дезактивированных ядерных боеголовок оружейные уран и плутоний должны стать недоступными для повторного вовлечения в производство ядерного оружия.

Изотопный состав плутония, нарабатываемого в энергетических реакторах на тепловых нейтронах (так называемый гражданский или энергетический плутоний), зависит от глубины выгорания топлива и существенно отличается от изотопного состава оружейного плутония. В легководном реакторе электрической мощностью 1000 МВт ежегодно образуется около 200 кг изотопов плутония. При глубоком выгорании топлива (~ 60 МВт·сут /кг U) энергетический плутоний имеет примерно следующий состав: Pu²³⁹ – 60%, Pu²⁴⁰ – 25%, Pu²⁴¹ – 10%, Pu²⁴² – 3%, Pu²³⁸ – 2%.

В соответствии с современными технологиями изотопы урана и плутония при переработке ОЯТ разделяются, что классифицируется как риск распространения ядерного оружия. Отдельно выделенный энергетический плутоний также является предметом политики нераспространения: после соответствующего процесса очистки он пригоден для создания ядерных боеголовок. Их конструкция будет сложнее, мощность на порядок меньше, но поражающие факторы, характерные для ядерного оружия, останутся.

Значительная масса выделенных оружейного и энергетического плутония, а также изотопов урана находится на данном этапе в режиме складированного хранения на радиоперерабатывающих производствах. Однако длительное хранение плутония в связи с его высокой токсичностью является чрезвычайно дорогостоящим и опасным процессом. Хранение энергетического плутония свыше 2 лет сопровождается ухудшением качества из-за распада плутония-241 в еще более экологически опасный америций-241, который является сильнейшим γ -излучателем, легко распространяющимся с водой и накапливающимся в растениях. Это приводит к необходимости химического отделения америция от плутония, если предполагается повторное использование плутония.

Вследствие всего этого, перед принятием решения о переработке ОЯТ, необходимо предварительно определиться с дальнейшей судьбой основных материалов переработки – урана и плутония: будут ли они отнесены к категории высокоактивных отходов и потребуют соответствующих способов изоляции или к энергетическим материалам, с целью повторного использования в реакторе. В случае отсутствия такой определенности наиболее целесообразным представляется хранение отработавшего топлива без переработки до появления конкретной потребности в свежем топливе и затем в процессе переработки изготовление нужной топливной композиции.

Плутоний-239 является уникальным энергетическим источником и ключом к энергетическому потенциалу урана. На современном этапе утилизация как энергетического, так и оружейного плутония-239 осуществляется в составе смешанного уран-плутониевого топлива на базе диоксидов UO₂ и PuO₂, так называемого MOX-топлива, в активных зонах энергетических реакторов. В качестве урановой компоненты используется природный или обедненный уран, в качестве плутониевой – оружейный или энергетический плутоний. Содержание плутония в MOX-топливе, загружаемом в легководные реакторы, составляет 3-5%, в быстрые – 10% и выше. Для изготовления уран-плутониевого топлива используются разные технологии; одним из способов является, например, простое перемешивание порошков диоксидов урана и плутония.

Нейтронно-физические и технологические особенности эксплуатации уран-плутониевого топлива

Фабрикация MOX-топлива для легководных реакторов на основе энергетического плутония была поставлена на промышленную основу ещё в 70 годах. Одобрение на использование такого топлива было дано надзорными органами Франции, Бельгии, Германии, Швейцарии, Японии. Впервые MOX-кассета была загружена в энергетический легководный реактор в Бельгии в 1963 году. В настоящее время в мире несколько десятков реакторов на тепловых нейтронах имеют лицензии на эксплуатацию MOX-топлива. Как

правило, это реакторы в странах, либо имеющих мощности по получению энергетического плутония и изготовлению из него смешанного топлива, либо в странах, пользующихся услугами по переработке своего ОЯТ на этих производствах.

Однако эксплуатация МОХ-топлива в тепловых реакторах сопровождается рядом серьезных проблем:

высокая активность еще необлученного МОХ-топлива и связанная с этим необходимость дополнительного исследования безопасности при использовании существующего оборудования для обращения со свежим топливом;

в связи с высокой удельной активностью плутония-239, которая на несколько порядков превышает активность урана-235, для сохранения приемлемой активности воды в реакторе при работе АЭС потребуются на порядки уменьшить количество негерметичных тепловыделяющих элементов как по газовой плотности, так и по прямому контакту топлива с водой;

загрузка даже части активной зоны МОХ-топливом снижает эффективность органов регулирования (из-за высокого поглощения в плутонии, что смещает баланс поглощений в реакторе в его пользу);

доля запаздывающих нейтронов в плутонии втрое меньше, чем в уране (у плутония $\beta_{\text{эф}} \approx 0,2\%$), это меняет свойства реактора при маневрах мощности в более опасную сторону и др.

Поэтому, как показывают оценки и опыт стран, активно эксплуатирующих МОХ-кассеты в легководных реакторах, без изменения характеристик системы управления и защиты и/или соответствующей модернизации, по соображениям безопасности наиболее целесообразна загрузка в реактор не более 1/3 топлива МОХ с сохранением 2/3 обычного уранового.

Кроме этого, серьезной проблемой является обращение с облученным МОХ-топливом. Облученное в легководных реакторах, это топливо отличается от уранового сложным изотопным составом продуктов деления и актинидов. В плутонийсодержащем топливе образуется гораздо большее количество малых актинидов (америция, кюрия) вследствие большего захвата нейтронов в тепловой части спектра; увеличение доли этих нуклидов приводит к повышенной активности и тепловыделению облученного (U-Pu)O₂-топлива. Переработка такого топлива технологически сложнее, чем переработка уранового. Из-за сложного нуклидного состава ухудшаются эксплуатационные параметры регенерированного плутония второго поколения, и его целесообразно будет использовать только для загрузки в реакторах на быстрых нейтронах.

Опыт по использованию

Странами с наиболее развитой плутониевой технологией являются Франция, Бельгия, Великобритания. Так, например, во Франции, являющейся монополистом по поставкам МОХ-топлива и лидером по его использованию, смешанным топливом загружены около 20 французских реакторов и планируется увеличение их числа. При этом Франция в ближайшее время не планирует переработку облученных МОХ-кассет.

Частично загружены МОХ-топливом, произведенным во Франции, и несколько энергоблоков в Японии. Более того, в Японии запланировано строительство усовершенствованного реактора с водой под давлением, который, как предполагается, будет первым в мире реактором, работающим исключительно на МОХ-топливе, а также осуществляется строительство коммерческого завода по фабрикации МОХ-топлива для тепловых реакторов.

Несмотря на существующие проблемы с эксплуатацией смешанного топлива в легководных реакторах и сложности, возникающие при переводе реакторов на его использование, исследования в этом направлении продолжаются. Так, например, специалисты французской группы AREVA продолжают изучать возможности полного перевода реакторов EPR на работу с МОХ-кассетами. При этом первый блок с EPR, строящийся сейчас в Финляндии, будет эксплуатироваться на урановом топливе – по

крайней мере, в первые годы после пуска. Блок «Фламанвилль-3», сооружаемый во Франции, начнет работу со стандартной зоной, содержащей 30% МОХ-сборок. Для своих проектов в Великобритании группа AREVA надеется довести содержание смешанныхборок в зоне до 50%.

Большой интерес в настоящее время к сфере производства МОХ-топлива проявляет Китай, предпринимая попытки приобретения у бельгийских компаний и научных центров технологии фабрикации МОХ-топлива. У бельгийских специалистов есть большой опыт по этому направлению – всего в Бельгии было переработано 670 тонн ОЯТ с возвращением выделенного плутония в топливный цикл. Но несколько лет назад Брюссель заявил о завершении МОХ-программы, после чего наработки бельгийских атомщиков остались невостребованными в собственной стране.

Однако отношение к использованию МОХ-топлива в легководных реакторах неоднозначно. Так, например, Украина считает, что это в принципе ошибочный путь, и не планирует использования смешанного топлива в легководных реакторах, откладывая исследование этой проблемы до этапа перехода к строительству быстрых реакторов.

МОХ-топливо на основе оружейного плутония

Утилизация оружейного урана и плутония осуществляется в соответствии с российско-американскими межправительственными соглашениями. Так, в соответствии с соглашением ВОУ-НОУ (высокообогащенный уран – низкообогащенный уран) между РФ и США предусматривается перевод в течение двадцати лет 500 тонн извлеченного из российского ядерного оружия высокообогащенного урана в низкообогащенный уран для топлива американских АЭС. Что касается плутония, то каждая из сторон обязуется утилизировать 34 тонны избыточного оружейного плутония методом облучения МОХ-топлива в энергетических реакторах.

В настоящее время США не имеют мощностей по производству МОХ-топлива, и нет энергоблоков, в которых бы оно использовалось. Эксплуатация смешанного топлива в энергетических реакторах является новым опытом для Соединенных Штатов. Вместе с тем, именно США выбрали в качестве наиболее защищенной и безопасной формы для утилизации избытков оружейного плутония облучение МОХ-топлива в легководных реакторах, обосновывая свое решение тем, что формат выгоревших МОХ-борок на многие годы обеспечит эффективную радиационную защиту остаточного плутония с целью ненарушения режима нераспространения.

Предполагается, что в промышленных масштабах МОХ-сборки начнут загружаться в активные зоны американских реакторов в 2018 году. При их изготовлении будет использоваться оружейный плутоний, признанный избыточным для нужд национальной безопасности страны. Производство МОХ-кассет будет вестись на заводе в Саванна-Ривер, строящемся по французской технологии. Планируется, что завод будет выпускать топливо не только для реакторов PWR, а также и для BWR и легководных реакторов нового поколения, таких как AP1000.

Россия избрала схему утилизации, отличающуюся типом реактора: топливо из избыточного оружейного плутония будет загружаться в реакторы на быстрых нейтронах БН-800 и, возможно, БН-600. Сооружение реактора БН-800 ведется на площадке Белоярской АЭС. Его физический пуск намечался на конец 2013 г., а энергетический – на начало 2014 г.

Россия рассматривает плутоний, в первую очередь, как энергетический материал, который можно использовать в качестве топлива для АЭС. Однако в России ни один из тепловых реакторов не проектировался с учетом возможности использования МОХ-кассет, и нет действующих мощностей по производству такого топлива для легководных реакторов. В настоящее время работа по использованию МОХ-топлива в реакторах ВВЭР проводится в рамках исследований и расчетно-экспериментальных обоснований, достаточных для понимания и сравнительного анализа преимуществ и недостатков этого направления утилизации плутония. Исследования по оценке вариантов утилизации плутония ведутся с учетом возможности использования опыта и технологий зарубежных стран.

Для реализации российской концепции обращения с энергетическим и оружейным плутонием на Сибирском химкомбинате планируется организовать экспериментальное производство топлива для реакторов на быстрых нейтронах нового поколения. Новое производство будет создаваться в рамках проекта, предусматривающего разработку технологий ядерной энергетики естественной безопасности на основе реакторов на быстрых нейтронах и замкнутого ядерного топливного цикла. Этот проект является ключевым проектом Федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010-2015 годов и на перспективу до 2020 года». Разрабатываемая в рамках проекта технология должна быть реализована до 2020 года в опытном образце, а затем в промышленном комплексе, включающем в себя АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, производства по переработке ОЯТ и по подготовке всех видов РАО к окончательному удалению. Предприятие по промышленному производству МОХ-топлива для реактора БН-800 будет размещено на площадке ГХК в г. Железногорске.



Несмотря на активное использование в легководных реакторах уран-плутониевого топлива, сейчас уже очевидно как для стран с опытом обращения МОХ, так и для стран-новичков, что это было вынужденное решение, своеобразный технологический тупик. Оно является нерентабельным, не решающим проблем ни отходов, ни топливного баланса. Наоборот, при последовательном осуществлении такой стратегии ядерная энергетика лишается долговременной перспективы, связываемой с развитием быстрых реакторов в цикле U-Pu. Уникальный избыток нейтронов в этом случае (более 2 на сгоревшее ядро плутония в сравнении с ~ 1 для тепловых реакторов) создаст предпосылки как для овладения неисчерпаемыми ресурсами ядерного топлива, так и безопасности и связанной с ней экономикой, радиационно-эквивалентного обращения с отходами, нераспространения делящихся материалов. Только в рамках замкнутого ядерного цикла будущего при создании парка быстрых реакторов станет возможным решение проблемы утилизации плутония и других актинидов и в полной мере использование энергетического потенциала ОЯТ, наработанного в предшествующий период.

Источники:

1. Афров А.М. ВВЭР-1000: физические основы эксплуатации, ядерное топливо, безопасность /А.М.Афров, С.А.Андрущечко, В.Ф.Украинцев и др. – М.: Университетская книга, Логос, 2006. – 488 с.+16 с. Цв. вкл.

2. Обращение с облученным топливом РБМК-1000 и ВВЭР-1000 при развитии ядерной энергетики / Габараев Б.А., Ганев И.Х., Лопаткин И.В. [и др.] // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90, вып. 2. – С. 121–132.

3 AtomInfo.Ru, 12.01.2012

4 Концепция Российской Федерации по обращению с плутонием, высвобождаемым в ходе ядерного разоружения <http://www.armscontrol.ru/start/rus/publications/pu-cl.htm#authors>

5 <http://rosenergoatom.info>

Материал подготовили: Брылева В.А., Войтецкая Е.Ф., Нарейко Л.М.

Адреса для контактов:

ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси, 220109, Минск, ул. академика А.К. Красина, 99

тел.: 299-47-61, 299-45-56, факс: 299-43-55, E-mail: <http://www.sosny.bas-net.by>

E-mail: valentina.brylioiva@yandex.by

Для получения данного информационного бюллетеня просим подать заявку в электронном виде с указанием своего электронного адреса

©При перепечатке ссылка обязательна

По заказу Министерства энергетики Республики Беларусь