

Перевод исследовательских реакторов на низкообогащенное урановое топливо

Р.Г. Муранака*

В настоящее время в 52 странах действует около 350 исследовательских реакторов мощностью от менее 1 Вт до 100 МВт и выше. Эти реакторы используются во всех областях науки и техники. Сегодня они используются, главным образом, в таких областях, как фундаментальные исследования, производство радиоактивных изотопов, нейтронно-активационный анализ и испытание материалов.

Первые исследовательские реакторы, построенные в сороковых годах, были установками малой мощности и преимущественно использовались для изучения физики реакторов и реакторной технологии.

В 50-х и 60-х годах во всем мире строились исследовательские реакторы малой мощности, использующие урановое топливо, обогащенное изотопом ^{235}U по весу в пределах 20 %, т.е. использующие низкообогащенный уран. Это соответствовало требованию соблюдать условия, исключающие возможность использования ^{235}U для создания ядерного оружия. Однако широкое использование исследовательских реакторов для фундаментальных исследований, испытания материалов и производства радиоактивных изотопов обусловило высокий спрос на реакторы большей удельной мощности и на более высокие концентрации ^{235}U , что привело к замене ранее использовавшегося низкообогащенного уранового топлива ураном высокого обогащения, причем степень обогащения достигла 70 и даже 90 %. Высокообогащенное топливо обладает следующими преимуществами: оно более экономично, может использоваться в активной зоне реактора более продолжительное время, отличается более высокой удельной реактивностью. Это топливо стало легко доступным и использовалось не только для реакторов большой мощности, но и для реакторов малой мощности, для которых вполне пригодным было низкообогащенное топливо.

Однако в 70-е годы у многих вновь вызвало беспокойство то обстоятельство, что некоторые виды топлива и топливные циклы могут открыть легкий путь для получения ядерного оружия. Поскольку обогащение менее 20 % представляет собой общепризнанное препятствие для использования урана в ядерном оружии, некоторые государства-члены стали склоняться к максимальному снижению международной торговли высокообогащенным

ураном и разработали программы развития технических средств, позволяющих переводить реакторы на низкообогащенное топливо с наименьшими затратами. Это может повлечь за собой изменение конструкции реактора и разработку нового топлива. В результате реализации этих программ можно ожидать перевода большинства реакторов на использование низкообогащенного топлива.

Количество плутония в отработавшем топливе также вызывало беспокойство, особенно в том случае, когда топливо имело очень низкую степень обогащения или подвергалось облучению нейтронами при работе реактора на высоком уровне мощности. Количество получаемого плутония и степень обогащения урана должны учитываться при общей оценке возможностей распространения ядерного оружия при использовании того или иного реактора. Например, в случае типичного реактора мощностью 2 МВт, использующего уран 20-процентного обогащения по изотопу ^{235}U , выгружаемый топливный элемент содержит около 10 г плутония. В реакторах, использующих топливо с меньшим обогащением, содержание плутония может быть в 3–4 раза выше.

Критерии перевода исследовательских реакторов на низкообогащенное урановое топливо

При оценке практических возможностей перевода существующих исследовательских реакторов на использование топлива с низкообогащенным ураном должны приниматься во внимание три фактора:

- запас безопасности и надежность топлива не должны быть ниже, чем для существующих в настоящее время конструкций, основанных на применении высокообогащенного топлива;
- не должны выдвигаться требования существенного изменения конструкции реактора;
- не должно быть превышения допустимых потерь рабочих характеристик реактора (т.е. потока на единицу мощности) и увеличения эксплуатационных расходов.

Возможность снижения степени обогащения используемого в реакторе топлива должна оцениваться отдельно для каждого реактора. Существуют такие области применения исследовательских реак-

* Р.Г. Муранака является сотрудником Секции физики Отдела исследований и лабораторий МАГАТЭ.

торов в фундаментальных физических исследованиях, при испытании материалов или при производстве некоторых изотопов, для которых характерны требования обеспечения высоких значений нейтронных потоков, что может быть достигнуто только при использовании высокообогащенного топлива.

Простое замещение низкообогащенным ураном высокообогащенного топлива приведет к снижению рабочих характеристик активной зоны реактора и не сможет обеспечить удовлетворение вышеуказанных требований. Уменьшится реактивность топливной загрузки активной зоны, уменьшится глубина выгорания ^{235}U и возрастет стоимость топлива, и/или придется увеличить размеры активной зоны, а, следовательно, уменьшить отношение величины нейтронного потока к единице мощности.

Существует возможность уменьшения степени обогащения топлива для большинства конструкций исследовательских и испытательных реакторов, при условии сохранения количества ^{235}U в топливных элементах, несмотря на снижение степени обогащения. Действительно, необходимо увеличить содержание ^{235}U в топливе, чтобы компенсировать потерю реактивности в результате увеличения резонансного поглощения нейтронов ^{238}U , входящих в состав топлива.

Подбор содержания ^{235}U (т.е. сохранение одинакового веса ^{235}U в топливных элементах, содержащих низкообогащенный и высокообогащенный уран) должен был бы привести к изменению величины нейтронного потока на единицу мощности по сравнению с первоначальным топливом, но вследствие эффекта резонансного поглощения нейтронов ^{238}U в целом снизится реактивность и уменьшится глубина выгорания ^{235}U . Глубина выгорания может быть приведена в соответствие с первоначальным топливом (93% обогащения) посредством увеличения содержания ^{235}U в активной зоне с уменьшенным обогащением на 12–15%, хотя это и повлечет за собой уменьшение в активной зоне потока тепловых нейтронов на единицу мощности. Значение этих эффектов, связанных с изменениями нейтронных потоков, определяется особенностями конкретного реактора, теми задачами, для решения которых он используется, а также принятой схемой перевода. Например, уменьшение потока тепловых нейтронов в отражателе, окружающем активную зону, и потока в ловушке нейтронов обычно намного меньше, чем в активной зоне. Стоимость может быть снижена за счет продления топливного цикла путем дальнейшего увеличения содержания ^{235}U .

Увеличить содержание урана в каждом топливном элементе можно либо путем увеличения объемной доли урана в топливном элементе, либо путем увеличения количества урановых блоков в имеющемся объеме.

Увеличение в топливном элементе занимаемого ураном объема может потребовать изменения конструкции топливного элемента. Существуют три возможных варианта: уменьшение толщины оболочки; уменьшение объема каналов для прокачки

теплоносителя; увеличение толщины топливных пластинок и тем самым сокращение количества пластинок в одном элементе. Одной из функций оболочки топливного элемента является удержание продуктов деления внутри топливного элемента и тем самым предотвращение их попадания в теплоноситель. Толщину оболочки нельзя сделать меньше некоторой минимальной толщины, необходимой для удержания продуктов деления. Объем, выделенный в топливном элементе для прокачки теплоносителя, также нельзя слишком уменьшать ввиду чрезмерного перепада давления теплоносителя в активной зоне, чего следует избегать, а также ввиду необходимости надлежащего замедления потока нейтронов в активной зоне. Сокращение количества пластинок может быть ограничено размерами минимальной теплопередающей поверхности, необходимой для предотвращения нежелательного кипения при данной мощности реактора.

Эти ограничения могут затруднить существенное увеличение объемной доли урана в топливном элементе для некоторых реакторов с высокими рабочими характеристиками, которые предназначены для эксплуатации в режимах, близких по теплогидравлике к предельным. Однако во многих действующих исследовательских и испытательных реакторах, особенно в реакторах малой мощности, занимаемый ураном объем в топливном элементе может быть увеличен.

Характеристики первичных топливных материалов, используемых в настоящее время в исследовательских реакторах

- Сплав уран-алюминий (U-Al) с плотностью урана до $1,1 \text{ г/см}^3$, но чаще менее 1 г/см^3
- Дисперсионный ураново-алюминиевый порошок в алюминиевой матрице (UAl_x-Al) с плотностью урана до $1,7 \text{ г/см}^3$
- Дисперсионный порошок окиси урана в алюминиевой матрице (U₃O₈-Al) с плотностью урана до $1,7 \text{ г/см}^3$
- Сплав урана и гидрида циркония (UZrH_x) с плотностью до $1,3 \text{ г/см}^3$, обычно называемый топливом для реактора „Трига“
- Топливо на основе окиси урана (UO₂) с плотностью до $9,1 \text{ г/см}^3$
- Находящийся в стадии разработки новый топливный материал представляет собой силицид урана (U₃Si), перемешанный или диспергированный в алюминий (U₃Si-Al)
Предлагаемая плотность составит соответственно 12 и 8 г/см^3

Увеличение количества урана в топливном элементе без изменения его толщины лишь очень незначительно влияет на теплогидравлические характеристики активной зоны, в связи с чем обычно не требуется изменять конструкцию топливного элемента. (Лишь в очень редких случаях может оказаться желательным увеличить объем теплоносителя для того, чтобы смягчить спектр нейтро-

Повышение плотности урана как возможное средство снижения степени обогащения топлива для исследовательских и испытательных реакторов с топливными элементами пластинчатого типа

Тип топлива	Обычная загрузка урана (г/см ³)	Загрузка урана в ближайшей перспективе (г/см ³)	Загрузка урана в долгосрочной перспективе (г/см ³)	Степень обогащения уранового топлива в настоящее время /ближайшая перспектива/ долгосрочная перспектива (%)		
				реакторы малой мощности	реакторы высокой мощности	реакторы очень высокой мощности
Сплав U-Al	1,1	1,3	~1,6	<20	70/45/45	90
UAl _x -Al	1,7	от 2,2 до 2,6	от 2,6 до 2,8	<20	45/20/20	93/45/45
U ₃ O ₈ -Al	1,7	от 2,2 до 3,3	от 3,3 до 3,8	<20	45/20/20	93/45/45
UO ₂	9,1*	—	—	<20	<20	<20**
U ₃ Si-Al	—	от 4,2 до 6,0	от 7,0 до 8,0	<20	93/20/20	93/45/20
U ₃ Si (основная масса)	—	—	~11	<20	93/93/20	93/93/20

* Плотность 8,7 в случае, когда объемы циркония размазаны с содержанием топлива. Плотность составляет 10,3 г/см³.

** Для реакторов очень высокой мощности UO₂, по-видимому, должен изготавливаться в очень тонких сечениях для обеспечения надлежащего теплоотвода.

нов, ужесточение которого обусловлено увеличением содержания урана). Единственным ограничением при данном подходе является самая высокая плотность урана, которая практически возможна при самой передовой технологии производства топлива. Этот подход может быть непосредственно осуществлен во всех исследовательских и испытательных реакторах, в которых плотность урана меньше, чем в топливных элементах, изготовленных по современной технологии. Если такой подход должен использоваться в реакторах, где уже применяется самая передовая технология производства топлива, то в этом случае следует разработать новую, усовершенствованную технологию изготовления топливных элементов, обеспечивающую более высокую плотность урана. Аргентина, Канада, Франция, ФРГ, Япония, США и Великобритания в настоящее время разрабатывают такую технологию. Но для получения необходимых характеристик топлива потребуются несколько лет.

В случае топлива UZrH_x для реактора „Трига” (см. текст в рамке) уменьшение степени обогащения обеспечивается за счет увеличения концентрации урана в сплаве UZrH_x. Геометрия топливных элементов остается неизменной.

Разработка топлива

Основная цель программ по разработке топлива заключается в усовершенствовании существующих и создании новых топлив, обеспечивающих максимальную загрузку урана с целью улучшения характеристик исследовательских и испытательных реакторов, использующих топливо с уменьшенным обогащением. Усилия по разработке топлива были сконцентрированы на решении двух проблем: с одной стороны, они были направлены на усовершенствование существующего топлива с целью получения максимальной загрузки урана, а с дру-

гой стороны, осуществлялась разработка нового высокоплотного топлива.

Выше в таблице приводятся пределы, до которых можно увеличивать плотность урана и уменьшать обогащение для используемых в настоящее время пластинчатых топливных элементов. Предполагается осуществить разработку урано-алюминиевых сплавов с содержанием урана 1,6–1,9 г/см³; однако это позволит перевести на низкообогащенное топливо только реакторы малой мощности. В алюминидовых и дисперсионном топливе U₃O₈ можно добиться плотности урана до 2,8–3,8 г/см³, что позволит перевести на низкообогащенное топливо реакторы большой мощности. Это дает основание предположить, что возможно создание топлива, содержащего до 60% (по объему) диспергированного урана. Если же, что более вероятно, удастся получить топливо лишь с 50-процентным содержанием диспергированного урана, то в таком случае диспергирование алюминидов не позволит осуществить перевод реактора большой мощности без некоторого изменения толщины топливных пластинок и геометрии топливных элементов. Это также относится к диспергированному U₃O₈. В настоящее время отсутствует почти полностью опыт в отношении объяснения высокой степени выгорания этих модификаций применяемого топлива; вместе с тем имеется довольно большой положительный опыт в отношении загрузок менее обогащенного урана. Исходя из этого, можно предположить, что, если удастся изготовить равномерно диспергированное топливо с высоким содержанием урана, то вполне вероятно, что такое топливо продемонстрирует удовлетворительное поведение при облучении.

В настоящее время накоплен некоторый опыт в отношении новых высокоплотных топлив. Что касается загрузки урана, то эти материалы являются более чем подходящими, и для этого может использоваться существующая технология диспергирования урана. Однако следует учитывать сов-

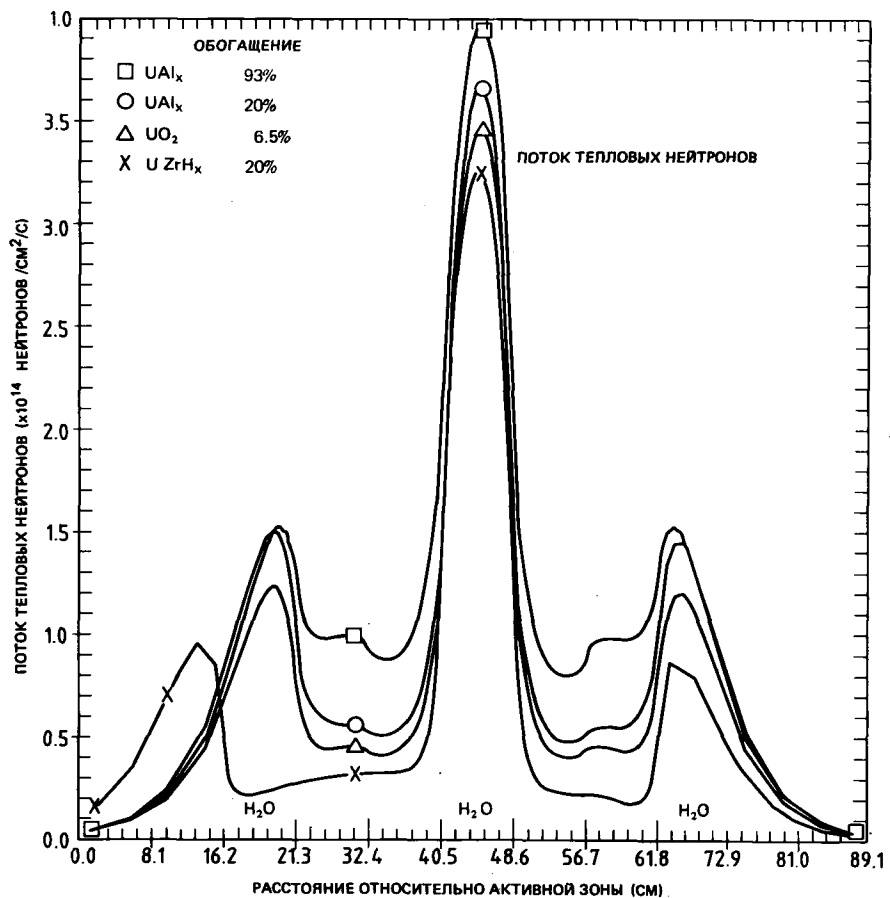
местимость топливной смеси и матрицы. Например, силицид урана (U_3Si) должен быть стабилизирован таким образом, чтобы его медленная реакция с алюминием в активной зоне не вызывала сильного разбухания. Такие дисперсии с 50-процентным или более высоким объемным содержанием диспергированного топлива, по-видимому, позволят осуществить перевод на низкообогащенное топливо даже исследовательских реакторов самой высокой мощности.

Вполне вероятно, что U_3Si может быть использован в качестве диспергирующего агента в алюминии. Увеличение в объеме за счет реакции образования UAl_3 может быть уменьшено или замедлено вследствие добавления сплава. Как показано в таблице, U_3Si обеспечивает более высокую загрузку урана по сравнению с эквивалентным объемом U_3O_8 или UAl_x . Добавление сплава не должно заметно уменьшить загрузку урана. Использование диспергированного алюминия, по-видимому, позволит применять существующую технологию вместо усовершенствованной технологии, которая может потребовать использования покрытия из циркония или другого более стойкого материала. Однако высокая разница плотностей U_3Si и Al может потре-

бовать более тщательного перемешивания порошков, обеспечивающего однородное распределение частиц топлива.

Пересмотр анализа безопасности и лицензирование

Применение новых топливных элементов в исследовательских реакторах должно повлечь за собой пересмотр существующих норм безопасности с тем, чтобы оценить новое соотношение факторов, определяющих безопасность реакторов. Объем необходимых работ будет зависеть от конкретных характеристик реактора, от изменений его конструкции, от подробностей, содержащихся в документации по анализу безопасности, и от требований лицензионных органов. Принципиальные вопросы будут включать влияние изменений обогащения и технологии изготовления топлива на температурный и пустотный коэффициенты реактивности, теплогидравлические критерии безопасности, удержание продуктов деления и эффективность системы контроля. Кроме того, в пересмотр анализа безопасности следует включить относящиеся к аспектам безопасности вопросы накопления плуто-



ния, гарантии и лицензирование. Основная ответственность за представление доклада по анализу безопасности должна быть возложена на организацию, занимающуюся эксплуатацией реакторов. МАГАТЭ готовит новое руководство, в котором рассматриваются вопросы безопасности и лицензирования, связанные с ликвидацией активных зон исследовательских и испытательных реакторов.

Воздействие на использование реактора

Важно провести всестороннюю оценку влияния перевода на новый вид топлива на запланированное использование реактора. Например, для каждого конкретного случая важно оценить, как этот перевод отразится на запланированных программах реактора, предусматривающих облучение, производство изотопов и исследования с помощью нейтронных пучков. Таким образом можно определить поточные возможности исследовательского реактора, а его перевод на низкообогащенное топливо можно спланировать так, чтобы обеспечить наилучшим образом выполнение намеченных планов.

Результаты расчетов

Начиная с 1978 г., регулярно проходят совещания консультативной группы государств-членов МАГАТЭ, на которых обсуждаются вопросы, связанные с техническими проблемами безопасности при переводе активной зоны на менее обогащенное топливо. Технические вопросы рассматриваются в справочнике IAEA-TECDOC-233 „Перевод активной зоны исследовательского реактора с высокообогащенного уранового топлива на низкообогащенное урановое топливо”, Вена (1980 г.).

Резюмируя результаты расчетов, выполненных этой консультативной группой, можно сделать следующие выводы:

- Перевод некоторых реакторов с топлива 93-процентного обогащения на 43-процентное обогащение может быть легко реализован без изменения конструкции топливных элементов путем простого замещения новым топливом, изготовленным с помощью современной технологии. Расчеты пред-

сказывают весьма незначительное изменение нейтронного потока в экспериментальных зонах, что делает этот переход легкоосуществимым.

- При плотности урана в топливе от 2,83 до 2,91 г/см³ реактор можно перевести на топливо с 20-процентным обогащением. Продолжительность топливного цикла, по-видимому, будет равна продолжительности топливного цикла с высокообогащенным топливом при неизменной толщине топлива или неизменной геометрии топливных элементов. Таким образом, теплогидравлические условия, вероятно, останутся без изменений.

Масса ²³⁵U, видимо, увеличится на 15–18%. Следовательно, эффективность регулирующих стержней снизится. С другой стороны, изменение реактивности в процессе выгорания также будет незначительным. Таким образом, не потребуется изменять систему регулирующих стержней.

Поток тепловых нейтронов в топливной зоне уменьшается, примерно, обратно пропорционально увеличению массы ²³⁵U. Однако в зоне отражателя, расположенной за топливом, поток тепловых нейтронов быстро восстанавливается до значений, характерных при использовании высокообогащенного уранового топлива. Значения потока лишь на несколько процентов ниже в типичном канале для вывода излучения или в месте облучения внутри или вне активной зоны (см. рисунок).

- Реактор может быть, по-видимому, переведен на 20-процентное обогащение без изменения продолжительности топливного цикла, но в этом случае меньшая плотность урана компенсируется увеличением толщины топлива. Это может быть обеспечено за счет уменьшения сечения канала для теплоносителя и/или посредством уменьшения количества топливных пластинок в тепловыделяющих элементах, если теплогидравлические условия допускают это.

Вполне вероятно, что ведущиеся в настоящее время разработки нового топлива обеспечат технические средства, позволяющие уменьшать степень обогащения топлива в исследовательских и испытательных реакторах без существенного снижения их рабочих характеристик. Совершенствование используемых в настоящее время топлив должно позволить перевести на низкообогащенное топливо реакторы малой и средней мощности, а новые высокоплотные виды топлива должны позволить осуществить такой перевод и исследовательских реакторов большой мощности.