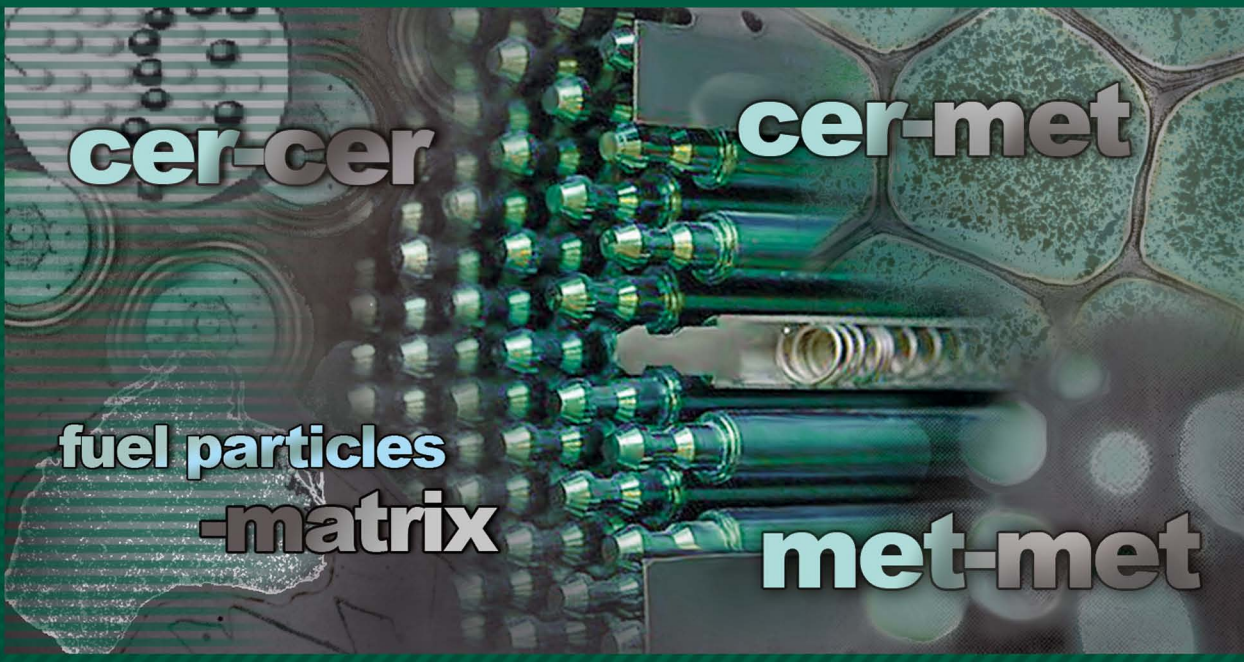
С.В. Алексеев, В.А. Зайцев, С.С. Толстоухов

ДИСПЕРСИОННОЕ ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО



С.В. Алексеев, В.А. Зайцев, С.С. Толстоухов

Дисперсионное ядерное топливо

ТЕХНОСФЕРА
МОСКВА
2015

УДК 621.039.54
ББК 31.4
А 47

А 47 Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С.
Дисперсионное ядерное топливо
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 248с. + 8 с. цв. вкл. ISBN 978-5-94836-428-5

В книге приведены сведения о роли дисперсионного топлива в ядерной энергетике. Кратко рассмотрены данные о применении дисперсионного ядерного топлива в реакторах различного назначения. Обобщены данные по свойствам и технологии получения дисперсионного ядерного топлива, в том числе для «сжигания» избыточного плутония.

Книга предназначена для научных работников и инженеров, работающих в области исследования и применения ядерного топлива.

УДК 621.039.54
ББК 31.4

© 2015, Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С.
© 2015, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-428-5

Содержание

Предисловие ... 6

Предисловие авторов ... 8

Основные условные обозначения и сокращения ... 10

Введение ... 11

Глава 1. Дисперсионное топливо в ядерной энергетике ... 12
1.1. Структура ядерного топлива исследовательских реакторов ... 13
1.2. Ядерное топливо дисперсионных твэлов исследовательских реакторов ... 18
1.2.1. Дисперсионное ядерное топливо первого поколения исследовательских реакторов ... 18
1.2.2. Исследовательские реакторы, используемые в настоящее время ... 20
1.2.3. Перевод исследовательских реакторов на низкообогащенное топливо ... 23
1.2.4. Модернизация исследовательских реакторов ... 25
1.3. Высокотемпературное дисперсионное ядерное топливо ... 26
1.4. Реакторы для ядерно-энергетических установок ВМФ ... 27
1.4.1. Атомные подводные лодки ... 28
1.4.2. Атомные надводные корабли ВМФ ... 30
1.5. Реакторы ядерно-энергетических установок гражданского флота ... 31
1.6. Использование дисперсионного топлива для региональной энергетики ... 35
1.7. Дисперсионное топливо атомных ракетных двигателей ... 37
1.8. Дисперсионное топливо высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов ... 38
1.9. Дисперсионное топливо энергетических реакторов ... 39
1.10. Топливо для «сжигания» плутония ... 40
1.11. Типы композиций дисперсионного ядерного топлива ... 43

Глава 2. Материалы матрицы дисперсионного ядерного топлива ... 45
2.1. Металлические матричные материалы ядерного топлива дисперсионного типа ... 46
2.1.1. Алюминий и его сплавы ... 46
2.1.2. Цирконий и его сплавы ... 48
2.1.3. Нержавеющие стали ... 51
2.1.4. Никель ... 53
2.1.5. Магний ... 55
2.2. Графит как матричный материал дисперсионного ядерного топлива ... 58
2.3. Матричные материалы дисперсионного топлива IMF ... 63
2.3.1. Материалы инертной матрицы на основе оксидов ... 63
2.3.2. Материалы инертной матрицы на основе нитридов ... 69
2.3.3. Материалы инертной матрицы на основе карбидов ... 71
2.3.4. Использование металлов в качестве инертной матрицы ... 72

2.4. Матричные материалы на основе соединений тория 73
2.4.1. Использование ThO_2 в качестве инертной матрицы 73
2.4.2. Использование карбидов тория в качестве инертной матрицы 78

Глава 3. Делящиеся материалы дисперсионного ядерного топлива 83
3.1. Уран и его сплавы 84
3.1.1. Металлический уран 84
3.1.2. Сплавы урана 85
3.2. Керамические соединения делящихся материалов 88
3.2.1. Диоксид урана 88
3.2.2. Карбиды урана 92
3.2.3. Мононитрид урана 95
3.2.4. Силициды урана 99
3.2.5. Диоксид плутония 105
3.2.6. Мононитрид плутония 106

Глава 4. Свойства дисперсионных топливных материалов 108
4.1. Свойства дисперсионного топлива на основе алюминиевой матрицы 108
4.1.1. Дисперсионные композиции на основе U-Al 108
4.1.2. Дисперсионное топливо на основе сплавов U-Mo 113
4.1.3. Дисперсионная композиция на основе UO_2 117
4.1.4. Дисперсионное топливо на основе U_xSi_y 119
4.2. Дисперсионные композиции на основе UO_2 – нержавеющая сталь 125
4.3. Дисперсионное топливо на основе урана и сплава U-Mo в матрице из магния 130
4.4. Дисперсионная композиция UO_2-Ni 133
4.5. Топливо реакторов HTGR 134
4.6. Высокотемпературное дисперсионное топливо 137
4.7. Дисперсионные композиции IMF 141
4.7.1. Матричные материалы IMF на основе оксидов 142
4.7.2. Матричный материал IMF на основе SiC 147
4.7.3. Керметные композиции IMF 148
4.8. Матричный материал IMF на основе тугоплавких соединений тория 149
4.8.1. Дисперсионные композиции на основе ThO_2 150
4.8.2. Дисперсионные композиции на основе карбидов тория 157

Глава 5. Изготовление топливных сердечников дисперсионного типа 159
5.1. Изготовление дисперсионных топливных сердечников методом плавки и литья 159
5.1.1. Сердечники твэлов на основе сплавов Al-U 159
5.2. Изготовление дисперсионных сердечников твэлов методом порошковой металлургии 160

5.2.1. Приготовление порошковых смесей дисперсионных композиций 160
5.2.2. Получение гранулированного топлива 162
5.2.3. Нанесение покрытий на гранулированное топливо 164
5.2.4. Формование заготовок топливного сердечника 167
5.2.5. Спекание и горячее прессование заготовок дисперсионных композиций 168
5.3. Дисперсионные композиции, получаемые методом порошковой металлургии 169
5.3.1. Сердечники на основе сплавов U-Al 169
5.3.2. Сердечники на основе UO_2-Al 170
5.3.3. Сердечники твэлов на основе U_3Si_2-Al 172
5.3.4. Сердечники твэлов на основе (U,Mo)-Al 175
5.3.5. Сердечники твэлов на основе (U,Mo)-Mg 181
5.3.6. Сердечники твэлов на основе UO_2 – нержавеющая сталь 182
5.3.7. Дисперсионные сердечники на основе UO_2-Ni 184
5.3.8. Дисперсионные сердечники твэлов керметного типа 184
5.3.9. Дисперсионные сердечники с керамическим топливом в матрице из графита 188
5.4. Изготовление дисперсионных сердечников IMF 189
5.4.1. Изготовление сердечников механическим смешиванием порошков 189
5.4.2. Изготовление сердечников из соосажденных порошков 192
5.4.3. Изготовление сердечников IMF гетерогенного типа 194
5.5. Изготовление сердечников IMF на основе соединений тория 198
5.5.1. Получение сердечников IMF на основе ThO_2 198
5.5.2. Изготовление топливных сердечников реактора HTGR из $(U,Th)C_2$ 202

Глава 6. Изготовление твэлов дисперсионного типа 205
6.1. Производство твэлов пластинчатого типа 206
6.2. Производство трубчатых твэлов 210
6.3. Изготовление твэлов стержневого типа 213
6.4. Получение графитовых твэлов реактора HTGR 217
6.5. Технологический контроль твэлов 220

Заключение 223

Литература 228

Предисловие

Устойчивое развитие современной цивилизации в значительной степени зависит от надежной энергетики, которая развивается опережающими темпами по сравнению с другими отраслями и требует различных и стабильных источников сырья вместо истощающегося углеводородного.

Альтернативой углеводородному сырью в настоящее время являются возобновимые источники энергии: гидроэнергетика, энергия ветра, биомасса, фотовольтаика, термальная энергия, энергия приливов и ядерная энергетика, а в перспективе – термоядерная.

Чернобыль и Фукусима серьезно подорвали доверие к ядерной энергетике. Однако в ежегодном докладе Международного энергетического агентства (МЭА) в 2011 году было подчеркнуто, что мир не может обойтись без ядерной энергетики, чтобы удовлетворить растущие потребности в электричестве, в связи с ее практически неограниченными ресурсами, а также экономическими и экологическими преимуществами перед традиционными источниками.

В настоящее время особо остро стоит вопрос безопасности ядерной энергетики и активно разрабатываются ядерные реакторы и тепловыделяющие сборки (ТВС) нового поколения. В этой связи большое внимание уделяется дисперсному ядерному топливу. Создание тепловыделяющих элементов (твэлов) на основе дисперсного ядерного топлива особенно актуально в связи с необходимостью обеспечения высокого потока нейтронов и повышенной радиационной стойкости при длительной эксплуатации в реакторе.

Тепловыделяющие элементы с дисперсным ядерным топливом нашли широкое применение в активных зонах реакторов различного назначения. Они успешно эксплуатируются в исследовательских и материаловедческих реакторах и используются при разработке ядерно-энергетических корабельных установок. Они эффективно проявили себя и в высокотемпературных газоохлаждающихся реакторах (HTGR).

Твэлы с дисперсным видом топлива обеспечивают надежное удержание всех продуктов деления и, в частности, актиноидов. Высокая теплопроводность дисперсных твэлов позволяет их эксплуатировать при значительных тепловых нагрузках.

В транспортных ядерно-энергетических установках, для атомных подводных лодок применение твэлов дисперсного типа позволяет обеспечить такие особенно важные требования, как повышенная надежность и безопасность для обслуживающего персонала при минимальных массовых характеристиках реакторов.

При разработке высокотемпературных газоохлаждающихся реакторов с самого начала в качестве ядерного топлива использовалось дисперсионное топливо с керамическими делящимися веществами и матрицей из графита. Преимуществом твэлов дисперсного типа являются также более широкие технологические возможности, позволяющие изготавливать твэлы самой разнообразной конфигурации: в виде лент, пластин, цилиндрических и крестообразных стержней, колец, шаров и т.д.

В последнее десятилетие XX века возник еще один стимул для применения ядерного топлива дисперсного типа. К этому времени СССР и США накопили избыточное количество оружейного плутония и договорились о прекращении его производства и использования в энергетике.

Проведенные к настоящему времени исследования показали, что дисперсное топливо в инертной матрице (IMF) позволяет повысить использование оружейного и энергетического плутония без его дальнейшей наработки. Этот вид топлива позволяет увеличить выгорание делящихся изотопов до 100 ГВт·сут./т и более, что увеличивает экономическую эффективность топливного цикла и значительно снижает стоимость электроэнергии. Использование IMF позволяет осуществлять прямое захоронение облученного ядерного топлива (ОЯТ), что уменьшает риск ядерного терроризма и более приемлемо с экономической точки зрения в связи со значительным снижением затрат на переработку и захоронение ОЯТ.

Разработка IMF показала, что в качестве матричного материала могут быть использованы и тугоплавкие соединения тория. Использование ThC_2 в качестве топлива реактора HTGR было весьма успешным. Хорошие результаты были получены при использовании (Th, Pu)O_2 и (Th, U)O_2 в легководных реакторах (LWR).

Таким образом, с использованием соединений тория в топливе IMF возникает возможность включить в топливный цикл торий, что в свою очередь позволит снизить количество высокоактивных радиоактивных отходов, подлежащих захоронению. Это связано с тем, что использование тория снижает количество трансурановых изотопов (Pu, Am, Np, Cm) в отработанном ядерном топливе на 2-м порядке по сравнению с ОЯТ уранового цикла.

Несмотря на многочисленные публикации о дисперсном ядерном топливе, мало сведений о технологии его получения и свойствах дисперсных твэлов. Особенно недостаточно сведений о разработке ядерного топлива с инертной матрицей, предназначенного для «сжигания» оружейного и энергетического плутония.

В представленной монографии С.В. Алексеева, В.А. Зайцева и С.С. Толстоухова «Дисперсионное ядерное топливо» авторы попытались восполнить этот пробел, собрав и проанализировав опубликованные данные. Это еще один шаг в разработке безопасных высокоэффективных реакторов для обеспечения устойчивого развития ядерной энергетики.

Н.П. Тарасова,
член-корр. РАН, профессор,
директор Института химии и проблем устойчивого развития,
РХТУ им. Д.И. Менделеева,
зав. кафедрой ЮНЕСКО «Зеленая химия для устойчивого развития»

Предисловие авторов

Энергообеспечение деятельности человеческого общества вызывает в последнее время значительные трудности. Создание устойчивой энергетики будущего возможно только при использовании восполняемых источников энергии или энергии деления ядер урана и плутония при их взаимодействии с нейтронами.

Использование энергии деления ядер U и Pu стало возможно после создания ядерного реактора, с помощью которого выделяемая в результате реакции деления ядер U и Pu энергия преобразуется в тепловую энергию.

Основной частью активной зоны (АЗ) ядерного реактора является тепловыделяющая сборка (ТВС), состоящая из тепловыделяющих элементов (твэлов), которые содержат ядерное горючее (делящиеся изотопы).

Ядерное горючее бывает металлическое (уран, плутоний и их сплавы), керамическое (оксиды, карбиды, нитриды и т.д. урана и плутония) и дисперсионное, в котором делящиеся вещества равномерно распределены в матрице из неделящегося вещества.

Актуальность создания твэлов на основе дисперсионного ядерного топлива особенно возросла в связи с необходимостью обеспечения высокого потока нейтронов и повышенной радиационной стойкости при длительной эксплуатации в реакторе.

Тепловыделяющие элементы с дисперсионным ядерным топливом нашли широкое применение в активных зонах реакторов различного назначения. Они успешно эксплуатируются в исследовательских и материаловедческих реакторах, нашли применение в ядерных энергетических установках на море и в космосе, эффективно проявили себя в высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах. Сведения о технологии получения и свойствах дисперсионных твэлов в основном опубликованы в 60–80 годы прошлого столетия в многочисленных статьях и научных изданиях отечественных и зарубежных специалистов.

Накопленные данные в нашей стране были обобщены в монографиях рядом коллективов авторов во главе с Займовским А.С., «Тепловыделяющие элементы атомных реакторов», 1966 г.; Самойловым А.Г., «Дисперсионные твэлы», 1965 г., 1982 г., «Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов», 1996 г.; Скоровым Д.М., «Реакторное материаловедение», 1962, 1968, 1979 гг.

Однако за последние 20–25 лет разработка дисперсионного ядерного топлива вышла на новый качественный уровень во многом благодаря принципиально новым возможностям исследовательского оборудования, а также востребованности решений ранее отложенных проблем развития атомной энергетики.

В многочисленных работах, посвященных исследованиям дисперсионного ядерного топлива, рассматривается влияние слоев взаимодействия делящего вещества с материалом матрицы на поведение дисперсионного топлива в условиях облучения. В рамках программы по снижению обогащения уранового топлива исследовательских и материаловедческих реакторов получены новые данные о композициях: силициды урана – алюминий и уран-молибденовые сплавы – алюминий. Стали известны результаты применения дисперсионного ядерного топлива при разработке ядерных энергетических установок специального назначения, а также накопленный опыт использования дисперсионного топлива при наработке изотопов.

В последнее время опубликованы данные о разработке ядерного топлива с инертными матрицами (IMF), предназначенного для «сжигания» избыточного оружейного и энергетического плутония. Также исследуется возможность использования дисперсионного топлива для увеличения выгорания ядерного топлива на основе урана. Возможности глубокого выжигания актинидов, реализуемые при использовании инертных матриц, несомненно, найдут свое применение при решении проблемы обращения с ОЯТ.

В представленной книге авторы обобщили опубликованные данные, рассмотрели вопросы технологии получения дисперсионного ядерного топлива, его свойства и возможности применения в новых проектах атомной энергетики.

Авторы надеются, что книга будет полезна для широкого круга научных работников, инженеров и конструкторов, занимающихся усовершенствованием и разработкой дисперсионного топлива и реакторов с его использованием.

Авторы заранее благодарны за все замечания по содержанию и форме изложения материала и надеются, что, несмотря на неизбежные недостатки и ограниченный охват опубликованных работ, книга послужит дальнейшему развитию исследований и более целенаправленному применению дисперсионного ядерного топлива.

Авторы выражают искреннюю признательность и благодарны Борисову Ю.С., Жарковой Т.Н., Лукину К.П. и Проценко О.В. за их бескорыстный труд и неоценимый вклад в подготовку рукописи книги к печати.

Введение

Основной частью тепловыделяющего элемента (твэла) является ядерное топливо, которое может быть гомогенным в виде соединений делящегося изотопа или гетерогенным, в котором частицы вещества делящегося изотопа равномерно распределены в матрице из неделящегося материала.

Характерной особенностью дисперсионного ядерного топлива является его повышенная радиационная стойкость при длительной эксплуатации в реакторе.

В связи с этим дисперсионное топливо нашло широкое применение в исследовательских и материаловедческих реакторах, а также в ядерных установках специального назначения, для которых характерны повышенные плотности делений, мощности энерговыделения и температуры.

В последнее время возник еще один стимул для разработки и применения топлива дисперсионного типа. Это связано с необходимостью снижения накопленных запасов оружейного и энергетического плутония. Для этого разрабатывается IMF-топливо (Inert Matrix Fuel), являющееся дисперсионной композицией, в которой плутоний равномерно распределен в безурановой матрице. IMF-топливо позволяет основательно снизить запасы плутония, значительно увеличить выгорание делящегося изотопа. Использование этого вида топлива обеспечивает прямое захоронение отработанного ядерного топлива.

В книге рассматривается место дисперсионного ядерного топлива в ядерной энергетике. Анализируются свойства компонентов дисперсионных композиций и их влияние на свойства дисперсионного топлива. Приводятся данные о свойствах дисперсионного ядерного топлива и его поведении в условиях реакторного облучения.

Книга состоит из 6 глав. В первой главе дан обзор дисперсионного ядерного топлива и его использования в реакторах различного назначения. В гл. 2–5 рассмотрены вопросы выбора материалов делящегося изотопа и матрицы, их наиболее важные физико-химические и механические свойства, определяющие свойства дисперсионной топливной композиции. В главе 6 кратко проанализированы вопросы технологии получения различных типов дисперсионных твэлов. Особое внимание уделено необходимости равномерного распределения частиц делящегося вещества в материале матрицы.

ГЛАВА I

ДИСПЕРСИОННОЕ ТОПЛИВО В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

С увеличением степени развития общества происходит неуклонный рост потребления энергии. Развитие промышленного производства, торговли, улучшение жилищных условий – все это требует дополнительного притока энергии. Без потребления энергетических ресурсов не обходится ни одна сторона жизнедеятельности человека. В связи с этим энергетика развивается опережающими темпами по сравнению с другими отраслями производства и требует значительных и стабильных источников сырья.

В настоящее время энергетические потребности в основном удовлетворяются за счет углеводородного сырья (нефти, газа и угля). Прогнозы показывают, что эта тенденция сохранится и в ближайшие десятилетия. Однако запасы углеводородов, особенно нефти и газа, достаточно ограничены, к тому же необходимы для быстро развивающегося транспорта и нефтехимии.

Альтернативой углеводородному сырью являются возобновляемые источники энергии (гидроэнергия, энергия ветра, биомасса, фотовольтаика, геотермальная энергия, энергия приливов) и ядерная энергетика.

Одним из величайших достижений XX столетия явилось овладение ядерной энергией деления атомов урана при взаимодействии их с нейтронами. Атомная энергия, особенно при условии эффективного замыкания ядерного топливного цикла, в общей энергетической стратегии объективно не представляет собой альтернативу углеродной или возобновляемой энергетике, а является практически единственным гарантом обеспечения безопасности государств мира на долгую перспективу.

Овладение энергией мирного атома стало возможно после создания ядерного реактора, устройства, в котором обеспечиваются условия самоподдерживающейся цепной реакции деления изотопов урана или плутония с участием нейтронов. Энергия, выделяющаяся в процессе деления, является источником тепловой энергии, которую (с помощью ядерного реактора) можно преобразовать в нужную форму.

Основной частью активной зоны реактора является тепловыделяющий элемент (твэл), представляющий собой ядерное топливо в том или ином виде, загерметизированное в оболочке.

По сравнению с началом становления ядерной энергетики в настоящее время расширился круг используемых ядерно-энергетических установок от мощных АЭС до космических аппаратов и ледоколов, для которых необходимо свое ядерное топливо. В качестве делящегося материала (ядерного топлива) используют металлический уран или плутоний и их сплавы, керамические соединения этих металлов (оксиды, карбиды, нитриды и т.д.), а также дисперсионное ядерное топливо, представляющее композицию, в которой делящийся материал распределен в матрице из неделящегося материала.

1.1. Структура ядерного топлива исследовательских реакторов

Еще на ранней стадии становления атомной отрасли стало очевидно, что без исследования поведения ядерного топлива и конструкционных материалов, а также твэлов, тепловыделяющих сборок (ТВС) и элементов внутриреакторных конструкций под облучением не обойтись. В связи с этим в 40–60 гг. XX столетия в странах, развивающих атомную отрасль, приступили к разработке и строительству атомных реакторов, предназначенных для проведения исследований по физике реакторов и материаловедческих исследований топливных и конструкционных материалов в условиях облучения.

Первый в мире исследовательский реактор (ИР) был построен в Чикаго (США) под руководством Э. Ферми в 1942 г. В 1946 г. под руководством И.В. Курчатова был построен аналогичный ИР в Москве (СССР).

В дальнейшем исследовательские реакторы были построены во многих странах. По данным [1], всего в мире было построено порядка 670 реакторов, из них 227 в США и 193 в СССР. По состоянию на октябрь 2011 г. в мире насчитывался 241 действующий ИР. К этому времени было остановлено 202 и выведен из эксплуатации 221 исследовательский реактор [1, 2].

По данным МАГАТЭ, термин «исследовательский реактор» включает физические реакторы, исследовательские реакторы, обладающие значительной плотностью нейтронного потока, реакторы, предназначенные для учебных целей, и реакторы-прототипы для ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

В настоящее время эксплуатируются исследовательские реакторы различных типов, отличающиеся по физическим характеристикам и назначению. По физическим характеристикам имеются ИР, нейтроны которых используются внутри реактора, и реакторы, нейтроны которых выводятся за пределы реактора с помощью пучков. Реакторы первого типа используются для исследования поведения материалов, твэлов, ТВС и внутриреакторных устройств под воздействием облучения нейтронами, а также для получения радиоактивных изотопов. ИР второго типа используются для исследований по ядерной физике, физике твердого тела и т.д.

В качестве ядерного топлива в активных зонах (АЗ) исследовательских реакторов используется топливо дисперсионного типа, которое представляет собой композицию ядерного топлива, в котором делящаяся фаза (^{233}U, ^{235}U,^{239}Pu) находится в виде частиц (металл, соединение), равномерно распределенных в матрице из неделящегося материала (металл, сплав, керамика, графит, другие материалы), а также из ^{238}U,^{232}Th, их сплавов и соединений.

Основным преимуществом ядерного топлива дисперсионного типа является его повышенная радиационная стойкость при длительной эксплуатации твэлов по сравнению с твэлами, содержащими сердечники из однородного ядерного топлива.

Высокая радиационная стойкость дисперсионного топлива обеспечивается его структурой, в которой продукты деления локализуются в топливных частицах или около них. Каждая частица ядерного топлива, диспергированная в топливной композиции, представляет микротвэл, в котором роль оболочки, сдерживающей

объемные изменения сердечника, выполняет матрица. Разобщенность продуктов деления и непрерывность матрицы предотвращают повреждение сердечника твэла.

Анализ структуры дисперсионного топлива и некоторые рекомендации рационального выбора размера топливных частиц и их расположения в материале матрицы с точки зрения радиационной стойкости приведены в работах американских ученых Вебера и Гирша [3, 4].

В дисперсных композициях топливные частицы различных форм и размеров хаотично расположены в матричном материале, и поэтому такие структуры трудно подвергнуть количественной оценке. Вебер и Гирш для анализа рассмотрели гипотетический случай, когда частицы делящегося материала в виде шаров одного размера правильно расположены в непрерывной матрице по схеме гранецентрированного куба. Процессы деления, происходящие в топливных частицах, и сопутствующие им повреждения сосредотачиваются почти полностью в них. Материал матрицы, окружающий топливную частицу, находится только под воздействием потока нейтронов. Однако часть материала матрицы, соприкасающаяся с ядерным горючим, также подвергается действию осколков деления. Предполагается, что термодиффузия продуктов деления заторможена настолько, что ею можно пренебречь. В этом случае продукты деления будут проникать в материал матрицы на определенную глубину только за счет энергии, приобретенной во время акта деления.

Таким образом, в процессе работы твэла в топливном сердечнике из дисперсионной топливной композиции вокруг каждой топливной частицы будет образовываться определенной толщины пояс поврежденного продуктами деления материала матрицы.

В табл. 1.1 приведены данные, характеризующие средние значения толщины поврежденного материала матрицы.

Таблица 1.1. Пробег осколков деления в некоторых металлических матрицах [3]

Материал матрицы	Средняя длина пробега, мкм
U	6,8
Zr	9,1
Fe	6,7
Al	13,7

Длина пробега осколков в диоксиде урана, наиболее применяемом делящемся материале дисперсионного топлива, равна 9,4 мкм.

На рис. 1.1 приведена фотография микроструктуры топливной композиции диоксид урана – нержавеющая сталь после облучения при температуре 500 °С до выгорания 30%. Из рис. 1.1 видно, что толщина поврежденного слоя нержавеющей стали находится в пределах 4–10 мкм (средняя величина равна 5,5 мкм).

После облучения дисперсионной топливной композиции весь объем матричного материала можно рассматривать как состоящий из двух частей: поврежденной и неповрежденной. При прочих равных условиях можно считать, что общий эффект повреждения матрицы в результате облучения зависит от отношения неповрежденной части матрицы к поврежденной ее части. По величине этого отношения можно судить, насколько в условиях облучения сохранились свойства матрицы.

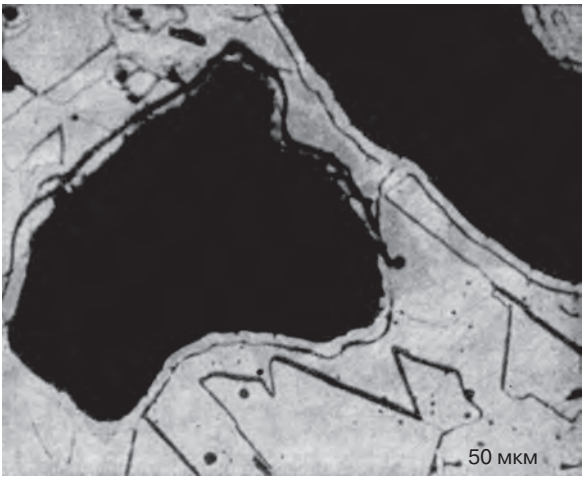


Рис. 1.1. Микроструктура дисперсионной топливной композиции UO_2 – нержавеющая сталь [5]

Таким образом, необходимым условием для наиболее полного сохранения свойств матрицы является непрерывность ее неповрежденной части. Для обеспечения устойчивости дисперсионной композиции необходимым условием является тот факт, что расстояние между частицами топливной фазы должно быть таким, при котором не происходит касание или перекрывание поврежденных частей (поясов) матрицы. Это расстояние зависит от объемной доли топливной фазы и размера ее частиц (рис. 1.2). Приведенные схемы различаются лишь размером частиц топливной фазы. Вокруг каждой частицы условно показан пояс материала матрицы, поврежденной в результате облучения. Из приведенных схем видно, что для композиции с размером частиц 180 мкм (рис. 1.2*а*) расстояние между частицами составляет 98 мкм, для частиц диаметром 90 мкм (рис. 1.2*б*) это расстояние равно 49 мкм.

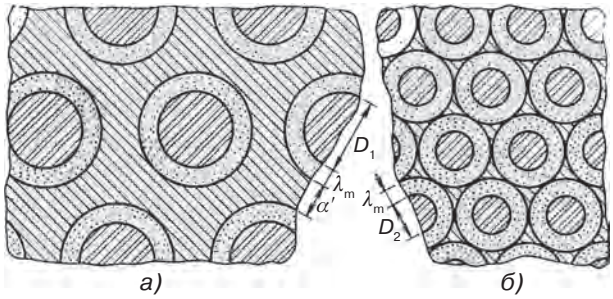


Рис. 1.2. Схема структуры дисперсионной топливной композиции (объемная доля топливных частиц 20%) [5]

Для гипотетического случая структуры, в которой топливные частицы сферической формы расположены по схеме гранецентрированного куба, в работе [5] предложена зависимость, связывающая расстояние между топливными частицами d, их размер D и объемную долю топливной фазы V_f:

$$d = D\left[\left(\frac{\pi}{3\sqrt{2V_f}}\right)^{1/3} - 1\right]. \qquad (1.1)$$

Эта зависимость справедлива для $V_f \le 0{,}74$, при $V_f = 0{,}74$ все топливные частицы будут находиться в контакте ($d = 0$), объемная доля топливных частиц, равная 0,74, является максимально возможной для сфер одного диаметра (рис. 1.3).

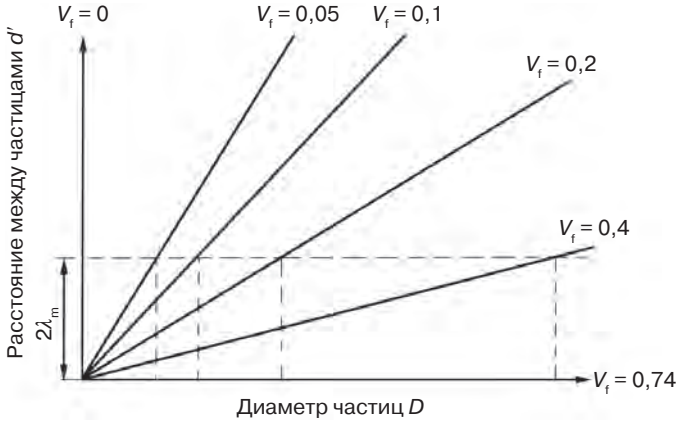


Рис. 1.3. Зависимость расстояния между частицами от их диаметра для композиций с различным содержанием топливной фазы [5]

Более подробно влияние структуры дисперсионной топливной композиции на ее свойства приведено в работе А.Г. Самойлова [5].

Наряду с изучением структуры дисперсионного топлива в 50–60 гг. двадцатого столетия предпринимались попытки оценить его напряженное состояние, возникающее в результате выгорания ядерного топлива. Такие попытки были предприняты в работах [3, 6] с использованием сферической симметричной модели, которая не учитывала механических свойств частиц и матрицы. В дальнейшем была предпринята попытка, учитывающая более точное распределение частиц с помощью конечноэлементной модели [7].

Для того чтобы достичь высокой мощности реактора, объемное содержание топливных частиц в дисперсионной композиции должно быть не менее 50%. При таком объемном содержании количество частиц ядерного топлива может достигать 10^8–10^9. Топливные частицы обычно распределены неравномерно, что делает структуру диспергированного топлива очень сложной и в значительной мере затрудняет оценку его напряженного состояния.

В работе [8] для более полной оценки реальной геометрии диспергированного ядерного топлива был использован трехмерный образец объемного элемента, который позволяет учитывать макродеформацию и по глубине.

Расчет деформированного состояния дисперсионной топливной композиции был выполнен при интенсивности деления ядерного топлива 10^{20}дел./м^3·с, а плотность топливной композиции была принята 98% от теоретической. Учитывалось,

что полный прирост деформации складывается из таких составляющих, как упругая, пластическая, тепловая деформация и увеличение объема, вызванного делением ядерного топлива. При этом увеличение объема топливной частицы происходит из-за газовых пузырьков, распухания твердых продуктов деления и изменения пористости частицы в связи с уплотнением.

Расчет напряженного состояния пластины дисперсионной топливной композиции показал, что с увеличением глубины выгорания напряжения на топливной частице изменяются с растяжения на сжатие, а напряжения растяжения на матрице резко возрастают (рис. 1.4). Предполагается, что наибольшее напряжение матрицы располагается на середине расстояния между частицами и может привести к разрушению топливной композиции в этой области.

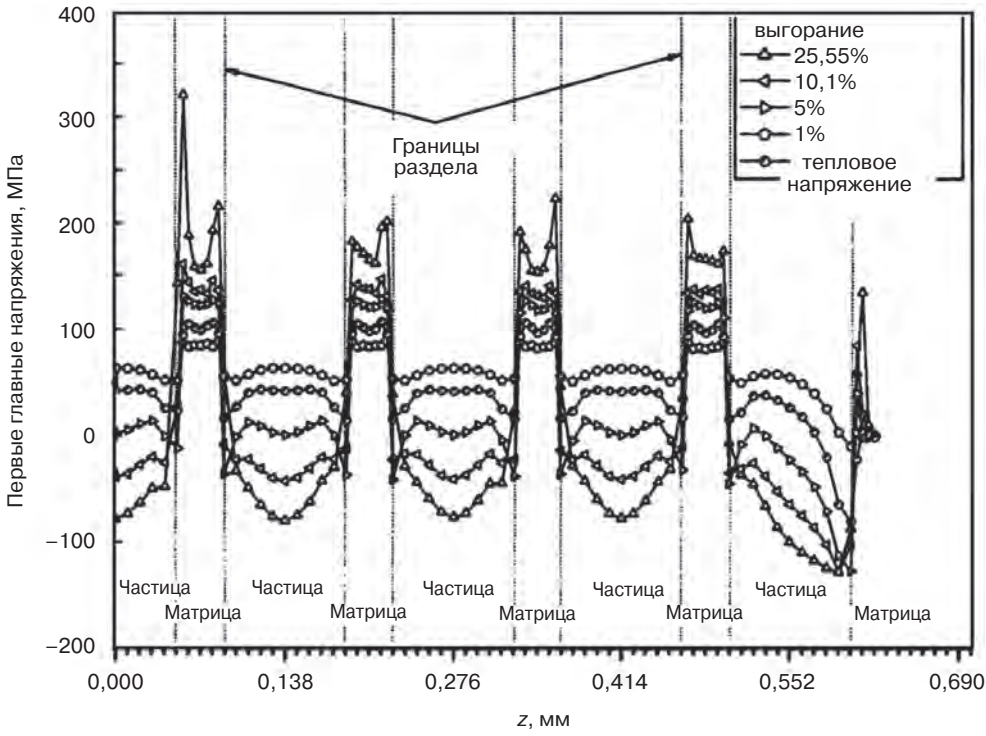


Рис. 1.4. Изменение первых главных напряжений по глубине пластины дисперсионной композиции в зависимости от выгорания [8]

Было также показано, что напряжение топливных частиц уменьшается при выгорании, а напряжение на матрице отрицательное. Этот факт указывает на то, что распухание топливных частиц ограничено, а матрица между топливными частицами вдоль направления длины или толщины дисперсионной композиции сжимается.

Учет макродеформации по глубине и ширине пластины из дисперсионной топливной композиции позволил выявить несферическую симметрию распределения напряжений в зависимости от глубины выгорания (рис. 1.5).

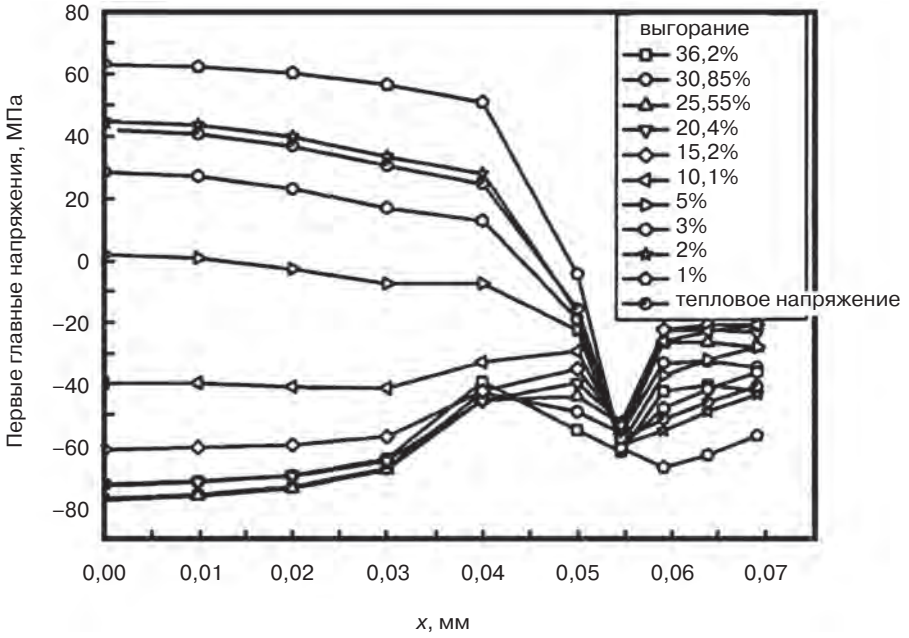


Рис. 1.5. Влияние глубины выгорания на изменение первых главных напряжений вдоль длины пластины из дисперсионной топливной композиции [8]

1.2. Ядерное топливо дисперсионных твэлов исследовательских реакторов

1.2.1. Дисперсионное ядерное топливо первого поколения исследовательских реакторов

В качестве топлива первых исследовательских реакторов США – CP-1 (1942), X-Ю (1944); СССР – Ф-1 (1946), ТВР (1949), использовался металлический уран. Активные зоны последующих исследовательских реакторов изготавливались уже из обогащенного урана. В табл. 1.2, 1.3 приведены характеристики некоторых исследовательских реакторов первого поколения, использующих дисперсионное топливо. Таблицы составлены на основе данных работы [5].

Таблица 1.2. Типы дисперсионного топлива исследовательских реакторов на основе металлического урана

№ п/п	Название реактора	Страна и год пуска	Содержание U в сердечнике, %	Обогащение ^{235}U, %
1	MTR	США, 1952	18,8 U-Al	93,4
2	FRM	ФРГ, 1956	45 U-Al	20
3	LIDO	Англия, 1956	20 U-Al	46
4	PTR	Канада, 1956	U-Al	90
5	APSARA	Индия, 1956	20 U-Al	46
6	MELUSINE	Италия, 1957	45 U-Al	20
7	IEAR-1	Бразилия, 1957	45 U-Al	20
8	MINERVE	Франция, 1957	45 U-Al	20

Таблица 1.2 *(окончание)*

№ п/п	Название реактора	Страна и год пуска	Содержание U в сердечнике, %	Обогащение ^{235}U, %
9	R-2	Швеция, 1959	U-Al	20–90
10	TRR	Иран, 1960	U-Al	20
11	BR-2	Бельгия, 1960	(20–25) U-Al	90
12	PRR-1	Филиппины, 1961	30 U-Al	20

Таблица 1.3. Дисперсионное топливо исследовательских реакторов на основе диоксида урана

№ п/п	Название реактора	Страна и год пуска	Состав сердечника, % UO_2	Обогащение ^{235}U, %
1	РФТ	СССР, 1952	UO_2-Al	90
2	AGN-211	США, 1952	$UO_2(U_3O_8)$ – полиэтилен	20
3	ВВР-2	СССР, 1957	UO_2 -Al	10
4	UPT	СССР, 1957	UO_2 -Mg	10
5	RA-1	Аргентина, 1958	45% U_3O_8-Al	20
6	ERR	США, 1959	5 UO_2 -ThO_2	93
7	PRTR	США, 1960	PuO_2-UO_2	UO_2 естеств. U
8	ML-1	США, 1961	31 UO_2 -BeO	93

На рис. 1.6 (см. цв. вклейку) показан внешний вид реактора RECH-1, Чили, год пуска 1974, топливо U-Al.

Сердечники твэлов первой в мире атомной электростанции (АЭС), построенной в 1954 г. (СССР), были изготовлены из дисперсионной композиции, в которой сплав U – 9% Mo был диспергирован в магнии [5].

На рис. 1.7 (см. цв. вклейку) показан зал реактора RA-3, Аргентина, год пуска 1967, топливо U_3O_8 – Al.



Рис. 1.6. Здание реактора RECH-1 [9]



Рис. 1.7. Зал реактора RA-3 [10]

1.2.2. Исследовательские реакторы, используемые в настоящее время

Из построенных с начала 50-х годов исследовательских реакторов разных типов по состоянию на середину 2012 г. в 58 странах эксплуатировалось 234, остальные окончательно остановлены или демонтированы, либо планировался их выход из эксплуатации [2].

По прогнозам МАГАТЭ, к 2020 г. число действующих исследовательских реакторов сократится до 100–150.

Среди действующих исследовательских реакторов:

- более 50% – это материаловедческие реакторы (MTR) и многоцелевые реакторы для производства изотопов, пучковых исследований и т.д.,
- около 20% являются критическими сборками малой мощности (от десятых долей ватт до сотен ватт),
- около 13% являются учебными реакторами небольшой мощности.

Продолжительность эксплуатации 70% действующих исследовательских реакторов составляет более 30 лет, а 50% – более 40 лет. Один из самых старых реакторов в мире, который эксплуатируется в течение почти 51 года, – крупнейший исследовательский реактор Бразилии IEA-RI. В табл. 1.4 приведены данные об основных материаловедческих реакторах, действующих в мире по состоянию на 2014 г.

Важным значением, определяющим возможности использования исследовательских реакторов, является отношение мощности (Φ) и плотности потока нейтронов (P). В соответствии с рекомендациями справочника МАГАТЭ [11] исследовательские реакторы разделены на две группы: маломощные (мощность менее 250 Вт) и высокоплотные (табл. 1.5). Отношение Φ/P – это главная характеристика, определяющая возможные сферы использования ИР:

- облучение материалов, введенных в реактор, для аналитических целей, производство изотопов, изучение радиационных эффектов,
- исследование на пучках нейтронов, выведенных за пределы реактора, в основном в аналитических целях (на установках с большими значениями мощности и потока),
- тестирование экспериментальных устройств и ядерного топлива в реакторах со специально созданными для этого условиями,
- обучение и тренировки.

Таблица 1.4. Основные действующие материаловедческие реакторы [2]

Страна	Реактор	Физический пуск, год	Тепловая мощность, МВт
Бельгия, Моль	BR-2	1961	100
Индия, Бомбей	DHR.UVA	1985	100
Канада, Чок-Ривер	NRU	1957	135
КНР, Омей	HEETR	1979	125
Нидерланды, Петтен	HFR	1961	45
Норвегия, Холден	HBWR	1959	25
Республика Корея, Дасжонг	NANARO	1995	30
Россия, Димитровград	СМ-2	1961	100
	Мир	1966	100
	Бор-60	1969	60
США, Айдахо	ATR	1967	250
Франция, Сакле	OSIRIS	1966	70
Чехия, Ржеж	LVR-15	1957	10
Япония, Оаран	JMTR	1968	50

Таблица 1.5. Соотношение мощности и плотности потока исследовательских реакторов [12]

Мощность (*P*), МВт	0,25	1	2	10	20
Плотность потока (*Ф*), нейтрон/см^2·с	$1 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	$2 \cdot 10^{14}$

На рис. 1.8 приведены величины отношения Φ/P, достигнутые на исследовательских реакторах в настоящее время.

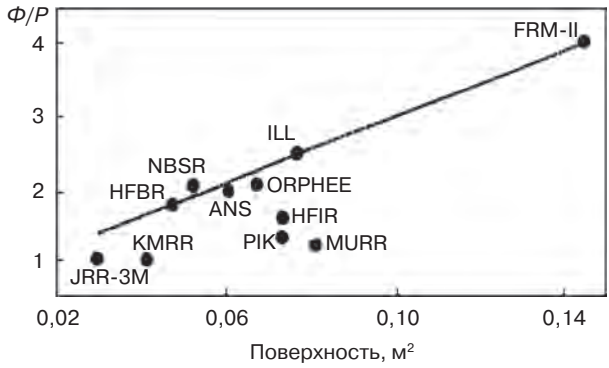


Рис. 1.8. Отношение Φ/P для исследовательских реакторов [13]

Производство книг на заказ
Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
125319, Москва, а/я 91
тел.: (495) 234-01-10
e-mail: knigi@technosphera.ru

Реклама в книгах:
• модульная
• статьи

Подробная информация о книгах на сайте
http://www.technosphera.ru

Алексеев Сергей Владимирович
Зайцев Владимир Алексеевич
Толстоухов Сергей Сергеевич

Дисперсионное ядерное топливо

Компьютерная верстка – В.В. Павлова
Дизайн – М.А. Костарева
Корректор – Н.А. Шипиль
Выпускающий редактор – О.Н. Кулешова
Ответственный за выпуск – С.А. Орлов

Подписано в печать 17.11.2015.
Формат 70x100/16. Печать офсетная.
Гарнитура Ньютон
Печ.л. 15,5. Тираж 500 экз., Зак. №
Бумага офсет № 1, плотность 65 г/м^2

Издательство «ТЕХНОСФЕРА»
Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 2

Отпечатано в ОАО «ИПК «Чувашия»
Мининформполитики Чувашии
428019, Чувашская Республика,
г. Чебоксары, проспект Ивана Яковлева, дом 13