

Исключение из конструкции головки ТВС с шестью сливными окнами аксиальных отверстий позволит улучшить перемешивание теплоносителя за счет интенсификации радиальных потоков на выходе из сливных окон.

Результаты исследований использованы при обосновании инженерных решений проектирования активных зон АО «ОКБМ Африкантов». Опытные данные использованы при валидации CFD-программы ЛОГОС.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2021-0008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев В.М., Большухин М.А., Пахомов А.Н. и др. Опыт создания первой в мире плавучей АЭС. Направ-

ления дальнейшего развития. — Атомная энергия, 2020, т. 129, вып. 1, с. 37—43.

2. Зверев Д.Л., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н. и др. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние. — Там же, с. 29—37.
3. Дмитриев С.М., Баринов А.А., Самойлов О.Б., Хробостов А.Е. Методы обоснования теплотехнической надежности активной зоны тепловых водо-водяных реакторов. — Там же, 2016, т. 120, вып. 5, с. 270—275.
4. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1973.
5. Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Применение многоканального пневмометрического зонда для исследований профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов. — Приборы и методы измерения, 2015, т. 6, вып. 2, с. 188—195.

Поступила в Редакцию 14.04.23

УДК 621.039.546:621.039.542.34

ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ С УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМИ УРАНОЕМКИМИ ДИСПЕРСИОННЫМИ ТВЭЛАМИ

Савченко А.М., Картюк Л.А., Дергунова Е.А., Коновалов Ю.В., Кулаков Г.В., Маранчак С.В., Ершов С.А., Купенко В.И., Майников Е.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: sav-alex111@mail.ru

В настоящее время в тепловых и быстрых реакторах используется таблеточное диоксид-урановое топливо или смешанное оксидное уран-плутониевое. Однако топливо такого типа имеет ограничения, например, недостаточную ураноемкость. Это снижает коэффициент воспроизводства и выгорание, что требует применения смешанного оксидного уран-плутониевого топлива с содержанием более 7% по массе диоксида плутония. Поэтому кампания активной зоны ВВЭР-1000 для твэлов с таким топливом составляет около 3—4 лет, в то время как с диоксидурановым от четырех до 5 лет. Ухудшение изотопного состава плутония от цикла к циклу позволяет использовать смешанное оксидное уран-плутониевое топливо в тепловых реакторах только в одном цикле. Недостатками также являются высокая температура и пониженная работоспособность в режиме переменной мощности. Увеличение продолжительности кампании потребует превышения 5%-ного барьера обогащения. Кроме того, технология переработки уран-плутониевого топлива сложная, и оно дороже обычного диоксидуранового.

Повторно используемое смешанное уран-плутониевое топливо может быть многократно применено в топливном цикле за счет достаточного количества делящихся изотопов. Однако оно требует постоянной подпитки обогащенным ураном и сопровождается накоплением ^{232}U и ^{236}U . Технология переработки также сложная.

Поскольку возможности совершенствования твэлов контейнерного типа почти исчерпаны, большой интерес вызывают альтернативные виды топлива и конструктивное исполнение твэлов. В частности, рассматривается переход к твэлам дисперсионного типа, которые имеют [1—4]:

низкий перепад температуры по сечению твэла благодаря теплопроводной матрице и металлургическому контакту оболочки с топливной композицией;

возможность достижения высокого выгорания топлива, обусловленного повышенной радиационной стойкостью.

Известно также, что твэлы дисперсионного типа допускают эксплуатацию в маневренных режимах почти без ограничения их числа и глу-

бины изменения мощности. При этом ураноемкость можно повысить, если использовать в качестве компонентов ураноемкие сплавы.

Металлическое топливо с матрицей из циркониевых сплавов. Разработанное в АО «ВНИИНМ» дисперсионное топливо представляет собой равномерно распределенные в сердечнике гранулы повышенной плотности из сплавов U—Mo, U—Nb—Zr, U_3Si или металло-керамического сплава, например, U—Mo—O—C—Si [1—3, 5]. Гранулы металлургически сцеплены между собой и с оболочкой твэла специально разработанными матричными сплавами на основе циркония с невысокой температурой плавления 790—860 °C [6]. Твэл с таким сердечником может быть изготовлен методом капиллярной пропитки, который включает в себя вибросыпку смеси гранул топлива и матричного сплава в циркониевую оболочку и последующую капиллярную пропитку путем кратковременного 1—5 мин нагрева до 840—900 °C (рис. 1) [1, 2, 6]. При этом циркониевый сплав полностью расплавляется и под действием капиллярных сил перемещается, заполняя стыки между гранулами, а также между топливом и оболочкой. В результате образуется металлургическое сцепление между оболочкой и сердечником, что обеспечивает высокую теплопроводность последнего, а также низкую рабочую температуру в центре твэла, соответствующую критерию «холодное топливо». Это делает твэлы работоспособными при переменных нагрузках, что позволит оптимизировать режимы эксплуатации АЭС и повысить их эксплуатационную надежность и безопасность.

Кроме того, в твэлах, полученных таким методом, формируется регулируемая пористость, которая может составлять в сердечнике от 16

до 38%. Это позволяет компенсировать распухание топлива до выгорания 1 г/см³, что в пересчете на штатный твэл ВВЭР соответствует 120 МВт·сут/кг.

Преимуществом разработанного топлива также можно считать высокую коррозионную стойкость благодаря наличию циркониевой матрицы. Скорость коррозии в воде при 350 °C составляет всего 0,02—0,05 г/(м²·ч).

Одним из основных преимуществ рассматриваемого топлива является возможность повышения его ураноемкости. В твэлах, изготовленных методом капиллярной пропитки, объемная доля топлива может составлять 66—72%. При этом ураноемкость под оболочкой твэла достигает 9,5—12,5 г/см³, что на 10—20% превышает этот показатель по сравнению со штатными твэлами.

В АО «ВНИИНМ» была изготовлена опытная партия укороченных твэлов и проведены реакторные испытания в облучательном устройстве реактора МИР АО «ГНЦ НИИАР» до выгорания 46 МВт·сут/кг, на участке длиной 1 см — до 60 МВт·сут/кг при значительных тепловых нагрузках. Послереакторные испытания подтвердили удовлетворительную работоспособность твэлов опытной партии [3]. Не наблюдалось изменения размера твэлов и взаимодействия компонентов в них. Гранулы топлива заполняли поры, что компенсировало распухание топливных частиц.

Рассмотрим возможность увеличения длительности кампании с использованием разработанного топлива. За счет большей ураноемкости в единицу объема можно загрузить значительно большее количество урана и тем самым продлить кампанию. На рис. 2 показаны результаты

расчета коэффициента размножения в зависимости от времени выгорания. При определении длительности принимали, что условная кампания завершается при достижении коэффициента размножения 1,04 с учетом утечки нейтронов для реакторов типа ВВЭР 4%. Полученная

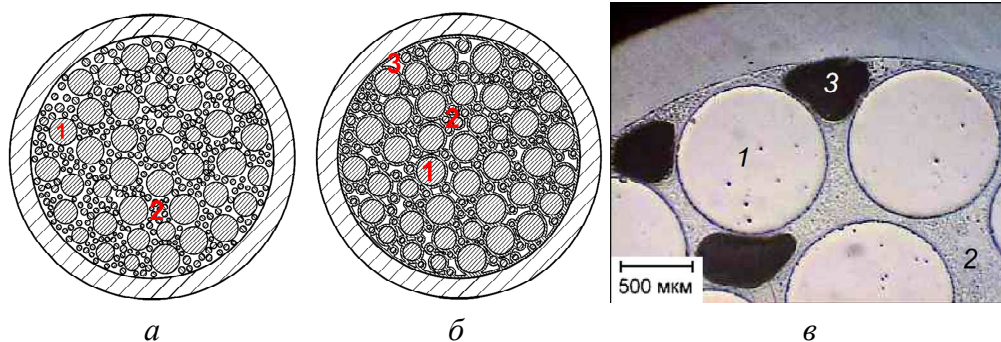
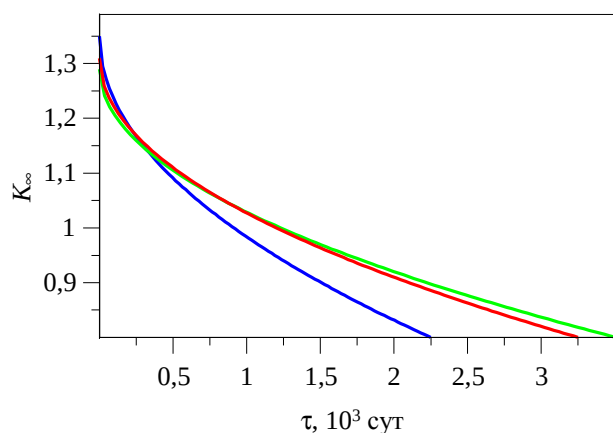


Рис. 1. Поперечное сечение твэла после виброснаряжения (а), капиллярной пропитки (б), микроструктура топлива U—Mo + циркониевый матричный сплав (в): 1 — топливо; 2 — матрица; 3 — поры



Р и с. 2. Зависимость от времени выгорания коэффициента размножения нейтронов ВВЭР-1000 с твэлами на основе штатного диоксида урана топлива (—) и разработанного композиций 3 (—) и 4 (—)

таким образом длительность условных кампаний для различных композиций, указанных в табл. 1 в процентном отношении к штатной загрузке, приведена в табл. 2. Анализ табл. 1, 2, рис. 2 показал, что увеличение длительности кампании при использовании разработанного

топлива составляет 6—25% по сравнению со штатным топливом ВВЭР за счет его большей ураноемкости, при этом удельный расход урана повышается на 8—28% по сравнению со штатным топливом ВВЭР-1000.

Таким образом, за счет большей ураноемкости длительность кампании может быть значительно увеличена по сравнению со штатным топливом ВВЭР или можно будет использовать топливо меньшего обогащения с сохранением существующей длительности кампаний ВВЭР.

Разработанное топливо за счет уменьшения соотношения водорода к урану приводит к высокоэнергетическому нейтронному спектру, соответствующему реактору на промежуточных нейтронах, и соответственно к увеличению образования плутония, вносящего дополнительный вклад в энерговыработку. Следует также отметить, что плутоний в разработанном топливе более высокого качества: делящиеся изотопы составляют в нем 75—78%, тогда как в диоксиде урана отработавших штатных твэлов 68—

Т а б л и ц а 1. Характеристики топливных композиций разработанного топлива

Номер композиции	Топливо	Циркониевый сплав	Поры	Топливо		Эффективная плотность урана под оболочкой твэла, г/см ³
	Объемная доля, %			Плотность, г/см ³	Состав сплава	
1	66	17	17	15,05	96,2% U + 3,8% Si	9,56
2	72	13	15	15,05	96,2% U + 3,8% Si	10,45
3	66	17	17	18,5	97,5% U + 1,5% Mo + 1% Zr	11,9
4	72	13	15	18,5	97,5% U + 1,5% Mo + 1% Zr	12,98
5	66	17	17	18	95,5% U + 3% Nb + 1,5% Zr	11,34
6	72	13	15	18	95,5% U + 3% Nb + 1,5% Zr	12,37

Примечание. В качестве матричного использовался сплав, содержащий 6,6% Fe, 2,5% Be, остальное — цирконий.

Т а б л и ц а 2. Характеристики условных топливных кампаний ВВЭР-1000 с разработанным металлическим топливом обогащением 4,95% в сравнении с диоксида урановым

Номер композиции	Длительность относительно штатной кампании с диоксида урановым топливом, %	Выгорание, МВт·сут/кг	Удельный расход природного урана относительно штатной кампании с диоксида урановым топливом, %
UO ₂	100	72	100
1	106	69	108
2	114	65	110
3	117	59	122
4	125	56	124
5	110	57	124
6	116	55	128

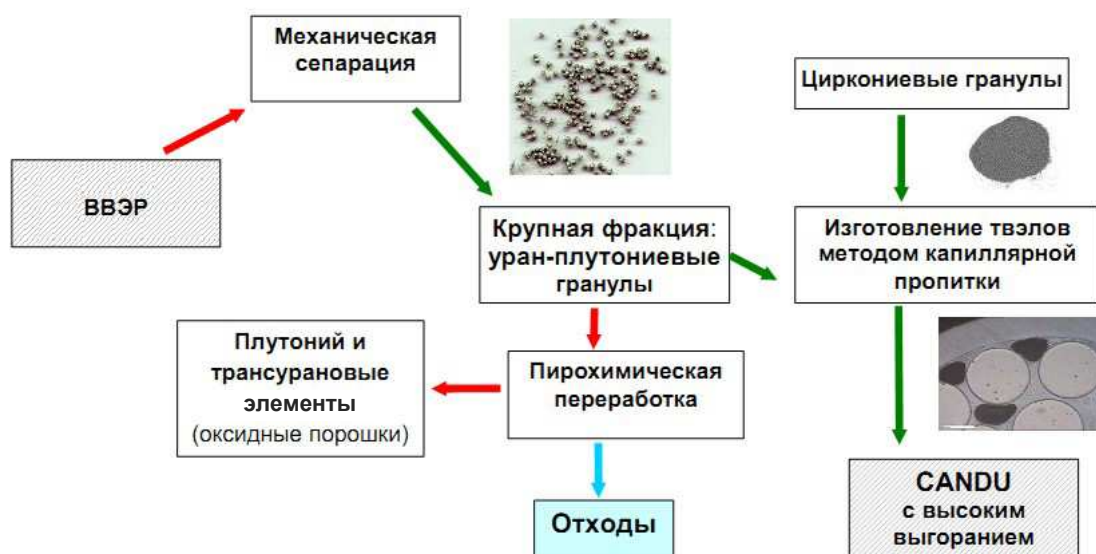
70%. Таким образом, плутония будет достаточно для изготовления в 3 раза больше уран-плутониевого топлива, чем в случае штатного топлива, что важно при замыкании ядерного топливного цикла. Кроме того, благодаря особенностям конструкции разработанное топливо может быть повторно использовано в РБМК, реакторах типа CANDU с минимальной переработкой (без химической переработки). Топливный цикл с разработанным топливом показан на рис. 3.

Выделенные после механической сепарации без химической переработки крупные гранулы металлического топлива с накопленным до 2% по массе плутонием и оставшимся ^{235}U до 1,3% по массе нагревают для удаления газообразных продуктов деления. Далее их можно использовать непосредственно для изготовления ТВЭЛов реакторов типа CANDU по технологии капиллярной пропитки. Процесс изготовления ТВЭЛов может проводиться дистанционно, он достаточно прост и проходит в две основные стадии: вибросыпка гранул извлеченного топлива с добавлением мелких гранул циркониевых матричных сплавов в оболочку и отжиг для жидкофазного спекания. Извлеченные гранулы топлива также можно подвергнуть химической (пирохимической) переработке с получением оксидов плутония и трансурановых элементов. Их можно использовать в ТВЭЛх с инертной матрицей или в виде композитного топлива.

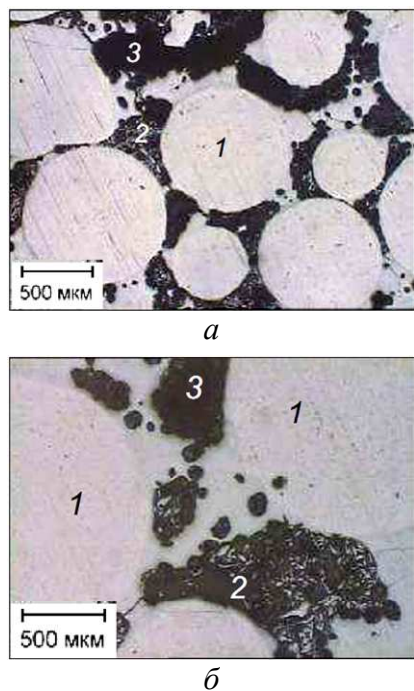
Композитное топливо $\text{U}(\text{Th})\text{—PuO}_2$. Это металлическое топливо с матрицей из циркониевых сплавов с добавкой порошка делящегося

диоксида плутония. Особенностью технологии ТВЭЛ с таким топливом является разделение операций: сначала изготавливается содержащий уран сердечник, затем в него вводится порошок диоксида плутония. Этот способ позволяет минимизировать количество пылеобразующих операций. На первой стадии с использованием отвалного или природного урана по технологии капиллярной пропитки изготавливается топливный сердечник, в котором пористость увеличена до 25—38%, ураноемкостью 9—9,5 г/см³ и теплопроводностью 16—18 Вт/(м·°С). Затем сквозь топливный столб через открытую пористость засыпается штатный порошок диоксида плутония с размером фракции до 100 мкм. Крупка диоксида плутония размещается в порах теплопроводного каркаса из урановой топливной композиции. Затем ТВЭЛ герметизируют. Микроструктура композитного топлива, в котором вместо диоксида плутония используется диоксид урана, показана на рис. 4. В таком ТВЭЛе смесь гранул циркониевой матрицы и диоксида урана засыпалась одновременно перед нагревом ТВЭЛа (до капиллярной пропитки).

Механизм функционирования композитного топлива следующий: сначала выгорает порошок диоксида плутония в каркасе циркониевой матрицы, в то же время в ней накапливается плутоний, поэтому топливо является зоной воспроизводства. На последней стадии начинает выгорать и само топливо. В связи с такой последовательностью процессов компоненты композитного топлива имеют разный изотопный состав плутония в конце кампании. В порошке



Р и с. 3. Топливный цикл с улучшенным металлическим (композитным) топливом



Р и с. 4. Микроструктура композитного топлива: *а* — уран-молибденовые гранулы и порошок диоксида урана в циркониевой матрице; *б* — распределение диоксида урана в порах уран-молибденового сплава: 1 — U—Mo; 2 — UO_2 ; 3 — поры

диоксида плутония будут накапливаться, в основном, неделящиеся изотопы, в рассматриваемом топливе — делящиеся. Поэтому при среднем выгорании смешанного уран-плутониевого топлива 45 МВт·сут/кг в нем будет 75% делящихся изотопов, в то время как в диоксиде плутония только 42%. При механическом отделении каркаса топлива от порошка диоксида плутония без химической переработки можно с большой эффективностью многократно использовать композитное топливо, экономя тем самым природный уран. Для смешанного уран-плутониевого топлива при данном выгорании концентрация делящихся изотопов в конце кампании составляет 55%, и его повторное использование экономически невыгодно.

Следует также отметить, что выгорание порошка диоксида плутония и гранул сплавов урана в композитном топливе примерно равномерное, поэтому после механического извлечения в гранулах окажется примерно в 2 раза меньше продуктов деления с большим паразитным захватом тепловых нейтронов, чем в таблеточном уран-плутониевом топливе. Таким образом, преимуществом этого топлива в качестве альтернативы смешанному можно считать не только большую ураноемкость и, как следствие,

большой коэффициент воспроизводства, но и низкую температуру сердечника. Кроме того, положительными факторами являются его радиационная стойкость в режиме переменных нагрузок и возможность разделения изотопов плутония. Привлекательной с точки зрения использования для производства твэлов является более экологически чистая технология, что возможно за счет сокращения числа операций, связанных с обработкой содержащего плутоний топлива. Этот подход может быть также применен при использовании гранул тория вместо гранул урановых сплавов. В этом случае коэффициент воспроизводства еще более увеличивается, что позволяет значительно повысить выгорание. Затем гранулы топлива могут быть извлечены из твэла дроблением сердечника и использованы повторно без химической переработки.

Конструкция твэла для сжигания трансурановых актиноидов. Для повышения эффективности цикла с композитным топливом для сжигания смеси изотопов плутония и трансурановых элементов вместо применяющегося таблеточного топлива из диоксидов Er , Y , Pu , Zr разработана новая конструкция топлива с инертной матрицей [7—11]. В ней порошки плутония и актиноидов локализованы в минитвэлах.

Мини-твэлы — это тонкие стальные или циркониевые оболочки, наполненные порошком оксидов плутония и/или актиноидов, герметизированные с обоих концов. Они размещаются в оболочке твэла, пространство между ними заполняется алюминиевыми или циркониевыми сплавами методами пропитки или капиллярной пропитки. При этом количество пылеобразующих операций с порошками делящихся элементов минимизировано. Эта конструкция удовлетворяет критерию прямого геологического захоронения и позволит также увеличить выгорание, уменьшить температуру топлива, компенсировать распухание и повысить работоспособность твэлов в маневренных режимах.

Переработка композитного топлива U(Th)—PuO_2 . При создании этого топлива особое внимание было уделено переработке и утилизации. Важно отметить, что топливо растворяется в горячей азотной кислоте, как и в стандартном процессе, так как объемная доля циркониевого матричного сплава в топливной

композиции небольшая, всего 10—15%. При этом из-за наличия в структуре большой объемной доли интерметаллидных фаз циркониевый матричный сплав в отличие от чистого циркония, как и урановое топливо, растворяется в азотной кислоте, хотя и значительно медленнее.

Для данного типа топлива можно также применить схему переработки, аналогичную *dupic*-технологии [12]. Сначала из топлива при нагревании удаляются газообразные продукты деления, затем твэл подвергают небольшой деформации. Мостики, связывающие циркониевый матричный сплав и топливные гранулы, разрушаются, и содержимое твэла высыпается на сито, где более мелкие фракции металлического топлива отделяются от более крупных, включающих также образовавшийся плутоний. Извлеченные гранулы состава $U-Pu-Mo$ или $U-Pu-Zr$ с учетом содержания в них около 2—3% накопленного плутония можно повторно использовать как топливо тепловых реакторов (РБМК, типа CANDU) по технологии капиллярной пропитки.

Такой же подход можно применить и для переработки композитного топлива $U-PuO_2$. Отличием такого топлива является раздельное размещение в твэле сплава из обедненного урана и диоксида плутония. Вследствие этого выгорание и изотопный состав в них будут разными. В то время как диоксид плутония почти полностью выгорает и в его составе почти не остается

делящихся изотопов, в разрабатываемом топливе накапливается плутоний с преобладанием делящихся изотопов, имеющих большую энергетическую ценность. Таким образом, в отличие от *dupic*-технологии для композитного топлива не требуется измельчения отработавших таблеток в порошок и сложного процесса изготовления из высокоактивного порошка новых таблеток. Энергетически ценные изотопы плутония ^{239}Pu и ^{241}Pu в основном уже отделены от ^{242}Pu и ^{240}Pu . Поэтому в отличие от стандартной конструкции твэла с гомогенным распределением тяжелых атомов, где разделение делящихся изотопов представляет сложную задачу, в разрабатываемом топливе они разделены изначально и процесс их разделения проводится без растворения и химической переработки. Это делает переработку отработавшего топлива технологичной и экологически более чистой, что упрощает замыкание ядерного топливного цикла. Возможность многократного использования переработанного плутония показана на рис. 5.

Извлеченные механической сепарацией крупные топливные гранулы, содержащие до 2% плутония с минимальным количеством продуктов деления и трансурановых элементов (фактически как в зоне воспроизводства быстрых реакторов), можно использовать для изготовления твэлов по приведенной схеме. Полученный порошок диоксида плутония после облучения в реакторе типа CANDU и стандартной



Р и с. 5. Топливный цикл легководяных реакторов на базе композитного топлива с многократным использованием переработанного плутония

химической переработки можно повторно использовать для изготовления композитного топлива.

Сепарированную мелкую составляющую композитного топлива — порошки циркониевого матричного сплава и диоксида плутония можно использовать для изготовления твэлов с инертной матрицей по приведенной упрощенной и более экологичной технологии.

В композитном топливе в отличие от смешанного уран-плутониевого с ухудшающимся с каждым циклом изотопным составом плутония можно многократно использовать плутоний и вместо однократного топливного цикла тепловых реакторов применять многократный, что может значительно уменьшить количество радиоактивных отходов. Таким образом, высокоплотное дисперсионное и композитное топливо можно использовать для замыкания уран-плутониевого цикла в тепловых реакторах. Благодаря свойствам такого топлива может быть повторно использовано около 48% переработанного топлива вместо 18% при использовании смешанного оксидного уран-плутониевого топлива. Оставшуюся необходимую часть плутония можно извлечь из отработавших твэлов тепловых реакторов.

Заключение. Использование в тепловых реакторах более ураноемкого дисперсионного металлического топлива $U-Mo$, $U-Nb-Zr$, U_3Si с матрицей из циркониевых сплавов может привести к увеличению кампании твэлов и/или снижению обогащения, что ведет к экономии природного урана, а также повышению коэффициента воспроизводства. Дополнительно более чем в 2 раза возрастает содержание плутония в твэле, что может значительно упростить замыкание ядерного топливного цикла.

На основе такого топлива предложено композитное топливо $U(Th)-PuO_2$, в котором сплавы из обедненного урана и диоксид плутония имеют гетерогенное распределение в топливной композиции. Сравнение со смешанным уран-плутониевым топливом показало в 4—5 раз более высокую теплопроводность, на 10—20% более высокое содержание урана и, следовательно, более высокий коэффициент воспроизводства. Предложенное топливо позволяет многократно использовать плутоний из отработавших твэлов и осуществить полное замыкание топливного цикла вместо частичного, что зна-

чительно снизит количество радиоактивных отходов.

Предложенный новый подход к переработке топлива может исключить растворение и химическую переработку с повторным использованием топлива в реакторах типа CANDU или PWR, что облегчает замыкание топливного цикла.

Таким образом, разработанное топливо дисперсионного типа и композитное $U(Th)-PuO_2$ в тепловых реакторах может заменить таблеточное диоксидурановое и смешанное оксидное уран-плутониевое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Savchenko A.M., Vatulin A.V., Konovalov I.I. e.a. Fuel of novel generation for PWR and as alternative to MOX fuel. — J. Energy Convers. Management, 2010, v. 51, p. 1826—1833.
2. Savchenko A.M., Vatulin A.V., Kulakov G.V. e.a. Peculiarities of fuel cycle with advanced composite fuel for thermal reactors. — Progress Nucl. Energy, 2014, v. 72, p. 119—125.
3. Савченко А.М., Коновалов Ю.В., Кулаков Г.В. и др. Новая концепция твэла МЕТМЕТ для использования в плавучих энергоблоках и атомных станциях малой мощности. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2021, вып. 4(110), с. 51—64.
4. Самойлов А.Г., Волков В.С., Солонин М.И. Тепловые элементы ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1996. 400 с.
5. Savchenko A.M. The issue of novel trends in fuel alloying to reduce interaction. — In: Proc. of the Research Reactor Fuel Management (RRFM-2018) Conf. Germany, 2018, paper A0147.
6. Савченко А.М., Коновалов Ю.В., Лаушкин А.В. и др. Циркониевые матричные сплавы для ураноемких дисперсионных топливных композиций. — Атомная энергия, 2017, т. 122, вып. 6, с. 349—352.
7. Degueldre C., Paratte J. Concepts for an inert matrix fuel, an overview. — J. Nucl. Mater., 1999, v. 274, p. 1—6.
8. Oversby V., McPheeters C., Degueldre C. e.a. Control of civilian plutonium inventories using burning in a non-fertile fuel. — Ibid., 1997, v. 245, p. 112.
9. Porta J., Doriath J.-Y. Toward very high burnups, a strategy for plutonium utilization in pressurized water reactors. — Ibid., 1999, v. 274, p. 153.
10. Schram R., Laan R., Klaassen F. e.a. The fabrication and irradiation of plutonium-containing inert matrix fuels for the «Once Through Then Out» experiment. — Ibid., 2003, v. 319, p. 118.
11. Lipkina K., Savchenko A., Skupov M. e.a. Metallic inert matrix fuel concept for minor actinides incineration to achieve ultra-high burn-up. — Ibid., 2014, v. 452, p. 378—381.
12. Lee T. Technological change of nuclear fuel cycle in Korea: the case of DUPIC. — Progress Nucl. Energy, 2004, v. 45, p. 85—102.

Поступила в Редакцию 14.07.22