

ПОВЫШЕНИЕ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ И ЗАЩИЩЕННОСТИ ТОПЛИВА ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ ВВЕДЕНИИ В ЕГО СОСТАВ ^{231}Pa И ^{237}Np

Г.Г. Куликов, Е.Г. Куликов, Э.Ф. Крючков, А.Н. Шмелев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва



Обосновано использование элементов ^{231}Pa и ^{237}Np в составе топливной композиции легководных реакторов в качестве выгорающих поглотителей, которые позволяют снизить начальный запас реактивности, существенно увеличить кампанию топлива и достичь сверхглубокого выгорания, а также повысить защищенность топлива от распространения. Введение ^{237}Np в состав топливной композиции позволило бы снизить требования к содержанию ^{231}Pa , который труднодоступен в существенных количествах. В то же время ^{237}Np присутствует в отработанном ядерном топливе энергетических реакторов, и в настоящее время не только не используется, но и представляет проблему с точки зрения его хранения и переработки. Поэтому целесообразно рассматривать пути его вовлечения в ядерный топливный цикл.

Ключевые слова: протактиний-231, нептуний-237, выгорающий поглотитель, легководный реактор, начальный запас реактивности, глубокое выгорание, сверхдлинная кампания, защищенность топлива от распространения.

Key words: protactinium-231, neptunium-237, burnable absorber, light water reactor, initial reactivity excess, high fuel burn-up, ultra long fuel lifetime, proliferation protection of fuel.

ВВЕДЕНИЕ

Среди основных проблем, стоящих перед ядерной энергетикой, можно отметить повышение эффективности использования топлива (наиболее распространенный тип реакторов – легководные – имеет выгорание на уровне 4–6% т.а. [1], т.е. лишь небольшая доля ядерного топлива расходуется для выработки электроэнергии). В работе показано, что введение в состав топливной композиции легководных реакторов таких элементов, как ^{231}Pa и ^{237}Np позволило бы существенно увеличить кампанию топлива и достичь сверхглубокого выгорания, а кроме того, повысить защищенность топлива от распространения.

В работе [2] рассматривалось введение ^{231}Pa в состав топливной композиции с целью повышения глубины выгорания топлива. При этом отмечалось, что увеличение кампании топлива до значительных времен (несколько десятков лет) позво-

лит уменьшить число перегрузок или исключить их вообще (реактор «Black Box» – «черный ящик»). Реакторы, способные работать без замены топлива длительное время, могут найти применение на станциях для удаленных районов, на плавучих атомных станциях, как источник энергии в космосе (базы на Луне, Марсе; космические аппараты, предназначенные для дальних полетов в космос).

В работе [2] делается вывод о том, что хотя в будущем благодаря термоядерным реакторам наработка ^{231}Pa станет возможной в существенных количествах, в настоящее время его накопление затруднительно. Иными словами, в ближней перспективе сомнительна возможность практической реализации предложенного способа повышения глубины выгорания топлива легководных реакторов.

Элемент ^{237}Np и его цепочка нуклидных превращений в нейтронном поле обладает схожими с ^{231}Pa свойствами с точки зрения возможности существенного увеличения кампании топлива и достижения сверхглубокого выгорания. Введение ^{237}Np в состав топливной композиции позволило бы, обеспечивая сверхглубокое выгорание топлива, снизить требования к содержанию ^{231}Pa , который труднодоступен в существенных количествах (или на некоторое время полностью заменить ^{231}Pa на ^{237}Np).

Нептуний присутствует в отработанном ядерном топливе (ОЯТ) энергетических реакторов и в настоящее время не только не используется, но и представляет проблему с точки зрения его хранения и переработки. Поэтому целесообразно рассматривать пути его вовлечения в ядерный топливный цикл.

Следует заметить, что так же, как и в работе [2], вопрос о достижении сверхглубокого выгорания рассматривается только с точки зрения выбора состава топливной композиции, а материаловедческий аспект не анализируется. Отметим, однако, что в экспериментальных твэлах на реакторе БОР-60 было достигнуто выгорание более 30% т.а. (виброуплотненное оксидное топливо в стальной оболочке) [3].

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ

Сравним три цепочки нуклидных превращений: реализованную на практике «традиционную», начинающуюся с ^{238}U ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow ^{240}\text{Pu} \rightarrow \dots$), и «нетрадиционные», в которых стартовыми нуклидами являются ^{231}Pa ($^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{232}\text{U} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow \dots$) и ^{237}Np ($^{237}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow \dots$) (рис. 1). Величины сечений радиационного захвата (σ_c) и деления (σ_f) представлены для условий активной зоны с плотностью теплоносителя $\gamma_{\text{T/Н}} = 0.72 \text{ г/см}^3$ (спектр нейтронов легководного реактора типа ВВЭР-1000). Реакция β -распада на рисунке опущена.

Можно видеть, что в «нетрадиционной» цепочке превращений, начинающейся с протактиния ^{231}Pa , размножающие свойства нуклидов улучшаются: стартовый нуклид (^{231}Pa) является поглотителем нейтронов, у второго нуклида (^{232}U) деление уже преобладает над захватом, а третий нуклид (^{233}U) хорошо делится. В данной «нетрадиционной» цепочке наблюдается комбинация двух следующих друг за другом делящихся нуклидов (^{232}U и ^{233}U). В то же время, в «традиционной» цепочке третий нуклид (^{240}Pu) является поглотителем нейтронов.

Таким образом, при использовании «нетрадиционной» цепочки, начинающейся с протактиния, поглощение нейтронов продуктами деления и выгорание делящихся нуклидов в процессе работы реактора в определенной степени компенсируются подпиткой от ^{231}Pa (благодаря образованию двух следующих друг за другом делящихся нуклидов ^{232}U и ^{233}U). Это позволяет говорить о принципиальной возможности увеличения кампании топлива и повышения глубины выгорания.

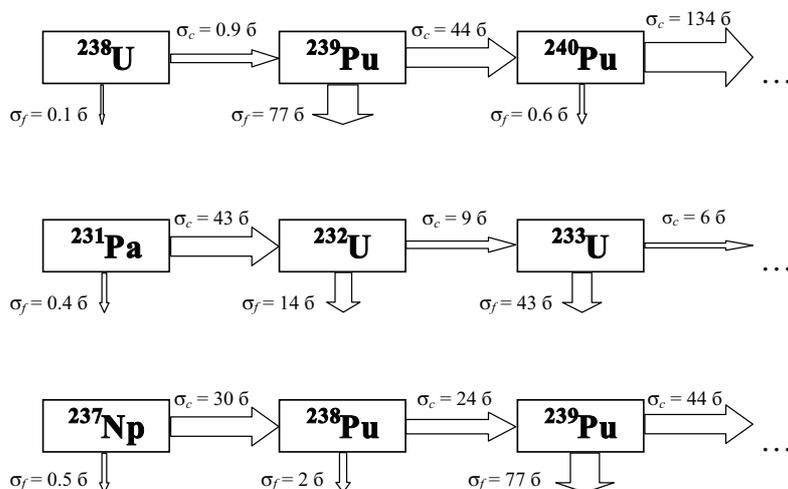


Рис. 1. Цепочки нуклидных превращений: ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow ^{240}\text{Pu} \rightarrow \dots$), ($^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{232}\text{U} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow \dots$) и ($^{237}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow \dots$) (плотность теплоносителя $\gamma_{\text{T/н}} = 0.72 \text{ г/см}^3$)

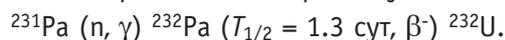
Отметим, что в топливе, используемом в реакторах типа ВВЭР-1000, подпитка от ^{238}U гораздо слабее из-за меньшего в десятки раз сечения захвата ^{238}U (0.9 б) по сравнению с сечением захвата ^{231}Pa (43 б) (см. рис. 1).

В отличие от цепочки нуклидных превращений ($^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{232}\text{U} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow \dots$) цепочка $^{237}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow \dots$ выглядит не так привлекательно, поскольку второй нуклид (^{238}Pu) является поглотителем в тепловом спектре нейтронов реактора типа ВВЭР-1000 ($\gamma_{\text{T/н}} = 0.72 \text{ г/см}^3$). Вместе с тем, размножающие свойства ^{238}Pu заметно улучшаются в резонансном спектре нейтронов. Так, в условиях активной зоны с плотностью теплоносителя $\gamma_{\text{T/н}} = 0.1 \text{ г/см}^3$ сечения радиационного захвата и деления ^{238}Pu оказывается близкими по величине (около 2 б). Поэтому в резонансном спектре нейтронов ^{238}Pu можно рассматривать как умеренно делящийся нуклид, хотя с точки зрения размножающих свойств он все-таки уступает ^{232}U (сечения радиационного захвата и деления которого составляют 2 и 5 барн соответственно).

Таким образом, как в тепловом, так и резонансном спектрах нейтронов цепочка нуклидных превращений, начинающаяся с протактиния, является более предпочтительной с точки зрения размножающих свойств составляющих ее нуклидов по сравнению с цепочкой нуклидных превращений, начинающейся с нептуния.

Важно отметить, что при введении ^{231}Pa или ^{237}Np в состав топливной композиции коэффициент размножения нейтронов на начало кампании существенно снижается, т.к. сечение захвата ^{231}Pa и ^{237}Np более чем на порядок превосходит сечение захвата ^{238}U (см. рис. 1). Поэтому наличие ^{231}Pa или ^{237}Np в составе топливной композиции позволяет иметь повышенное обогащение по делящемуся нуклиду при невысоком начальном запасе реактивности. Данное обстоятельство в значительной мере способствует повышению глубины выгорания топлива.

Теперь рассмотрим физические предпосылки повышения защищенности топлива при введении в него ^{231}Pa и ^{237}Np . Наличие в составе топливной композиции ^{231}Pa способствует интенсивной наработке ^{232}U при облучении топлива в реакторе:



Как известно [4], нуклид ^{232}U рассматривается как денатурирующий для уранового топлива. Данный изотоп урана является мощным источником тепла (за счет α -распада), а также нейтронов спонтанного деления (1300 н/с·кг [5]); кроме того, испускаемые им α -частицы способны генерировать нейтроны в (α, n)-реакциях

на ядрах легких элементов, которые всегда присутствуют в делящемся материале в виде примесей [6]. Внутреннее тепловыделение осложнит создание и поддержание в рабочем состоянии ядерного взрывного устройства из денатурированного урана, а в случае его создания повышенный нейтронный фон снизит энергетический выход такого устройства.

Что же касается вопроса о том, представляет ли сам нуклид ^{231}Pa опасность с точки зрения его потенциального использования в ядерных взрывных устройствах (ЯВУ), то можно отметить следующее. Критическая масса ^{231}Pa составляет 750 кг [7], что примерно соответствует критической массе урана, обогащенного до 20% по ^{235}U (который, согласно рекомендациям МАГАТЭ, является материалом непрямого использования [8]).

Введение в состав топливной композиции ^{237}Np способствует интенсивной наработке ^{238}Pu при облучении топлива в реакторе: $^{237}\text{Np} (n, \gamma) ^{238}\text{Np} (T_{1/2} = 2.1 \text{ сут}, \beta^-) ^{238}\text{Pu}$.

Нуклид ^{238}Pu рассматривается в качестве денатурирующего для плутония [4, 9]. Аналогично ^{232}U , изотоп ^{238}Pu является мощным источником тепла α -распада (570 Вт/кг [7]), что может привести к перегреву материалов, где он используется.

Важно отметить, что критическая масса ^{237}Np составляет около 57 кг [7], что примерно соответствует критической массе высокообогащенного урана. Он так же, как и ^{235}U , характеризуется рекордно низкой интенсивностью генерации нейтронов спонтанного деления [7]. Поэтому наличие в топливе нептуния, который может быть выделен с помощью химических методов, в принципе, нежелательно. Однако его невысокое содержание представляется приемлемым, так как его введение позволяет обеспечить защищенность плутониевой фракции.

Поскольку ^{231}Pa , ^{232}U , ^{237}Np и ^{238}Pu являются, по сути, малораспространенными нуклидами, то рассмотрим их нейтронно-физические свойства.

СРАВНЕНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ^{231}Pa , ^{232}U , ^{237}Np И ^{238}Pu

Подобно ^{238}U элементы ^{231}Pa и ^{237}Np можно рассматривать в качестве сырьевых нуклидов, которые практически не делятся тепловыми и промежуточными нейтронами, но способствуют наработке делящихся материалов (с той оговоркой, что нарабатываемый из нептуния ^{238}Pu может считаться делящимся материалом лишь в достаточно жестком спектре нейтронов). Зависимость сечения захвата ^{238}U и ^{231}Pa от энергии нейтрона представлена на рис. 2. Отметим, что энергетические зависимости сечения захвата ^{231}Pa и ^{237}Np схожи, поэтому для сохранения наглядности на рисунке представлена только энергетическая зависимость сечения захвата ^{231}Pa .

Отметим два важных обстоятельства. Во-первых, как уже упоминалось, в тепловой области энергий сечение захвата ^{231}Pa (и ^{237}Np) много больше, чем ^{238}U . В частности, для тепловых нейтронов ($V = 2200 \text{ м/с}$): $\sigma_c (^{231}\text{Pa}) = 202 \text{ б}$, $\sigma_c (^{237}\text{Np}) = 178 \text{ б}$, $\sigma_c (^{238}\text{U}) = 2.7 \text{ б}$. В связи с этим топливная композиция, имеющая в своем составе ^{231}Pa и ^{237}Np , характеризуется высокой скоростью накопления делящихся материалов (^{232}U из ^{231}Pa ; ^{238}Pu из ^{237}Np).

Второе важное обстоятельство заключается в том, что резонансы ^{238}U и ^{231}Pa (^{237}Np) энергетически разнесены. Резонансы протактиния и нептуния начинаются в области достаточно низкой энергии (порядка 0.5 эВ) (рис. 2). Это означает, что введение протактиния (или нептуния) в состав топливной композиции приведет к дополнительному «выведанию» тепловых и эпитепловых нейтронов (рис. 3).

Из рисунка 3 следует, что полная замена в топливе ^{238}U на ^{231}Pa (или ^{237}Np) (с увеличением содержания делящегося материала для сохранения критичности)

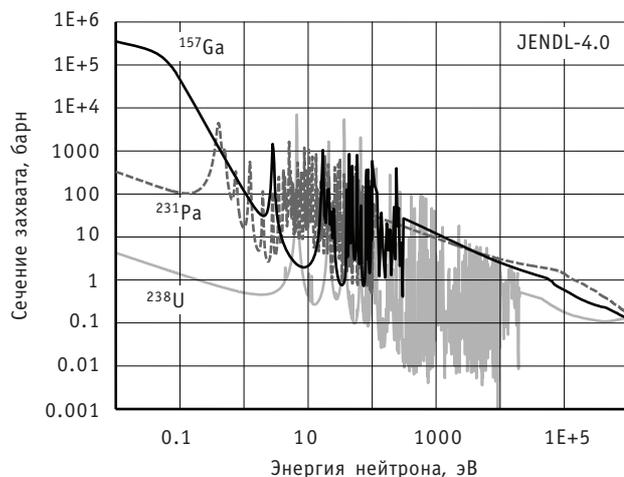


Рис. 2. Зависимость сечения захвата ^{238}U , ^{231}Pa и ^{157}Gd от энергии нейтрона

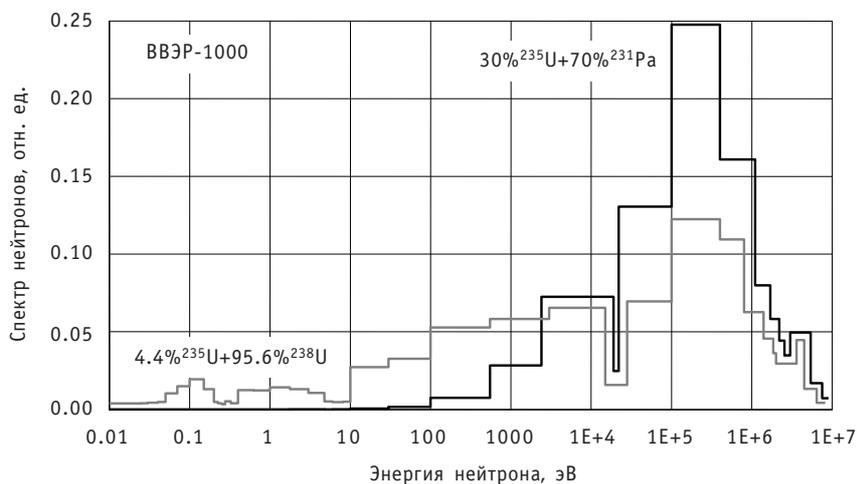


Рис. 3. Влияние протактиния на спектр нейтронов

приводит к значительному изменению спектра нейтронов. Можно видеть, что в то время как спектр нейтронов реактора типа ВВЭР-1000 с типичной урановой загрузкой характеризуется важной долей тепловых и эпитепловых нейтронов, при введении в топливо существенной доли ^{231}Pa (или ^{237}Np) тепловая и эпитепловая (до 1 кэВ) части спектра становятся незначительными. Поэтому в данном случае для достижения глубокого выгорания в качестве конструкционного материала можно использовать сталь. Действительно, при уменьшении доли тепловых и эпитепловых нейтронов поглощение в элементах, входящих в состав стали, снижается. Вместе с тем использование стальной оболочки способствует сохранению работоспособности твэла при более глубоком выгорании по сравнению с оболочкой, выполненной из циркония и сплавов на его основе.

Важно отметить, что в определенном смысле ^{231}Pa и ^{237}Np можно рассматривать также и в качестве выгорающих поглотителей: в течение кампании они выгорают на 60–90% (превращаются в делящиеся нуклиды), а их сечение захвата на порядок превосходит сечение захвата сырьевого нуклида ^{238}U (см. рис. 1). При этом ^{231}Pa и ^{237}Np можно сравнить с известным выгорающим поглотителем – гадолинием (^{157}Gd), достаточно широко используемым в легководных реакторах.

В результате такого сравнения можно заключить, что протактиний и нептуний как выгорающие поглотители выгодно отличаются от гадолиния по следующим причинам. Во-первых, их сечение поглощения не так велико, как у гадолиния (см. рис. 2), и поэтому их стабилизирующее влияние на размножающие свойства топлива сказывается существенно дольше, чем при использовании гадолиния. Во-вторых, в отличие от гадолиния протактиний и нептуний играют две роли: сначала – выгорающего поглотителя, а затем – делящегося материала (за счет образования делящегося нуклида ^{232}U , а затем и ^{233}U из протактиния; или ^{238}Pu , а затем и ^{239}Pu из нептуния).

Теперь рассмотрим свойства ^{232}U , который образуется в результате реакции захвата на ^{231}Pa и последующем β -распаде ($T_{1/2} (^{232}\text{Pa}) = 1.3$ сут), и свойства ^{238}Pu , который образуется в результате реакции захвата на ^{237}Np и последующем β -распаде ($T_{1/2} (^{238}\text{Np}) = 2.1$ сут). Подобно ^{235}U элемент ^{232}U относится к делящимся нуклидам, а ^{238}Pu в зависимости от спектра нейтронов является поглотителем (применительно к тепловому спектру нейтронов) или умеренно делящимся материалом (применительно к резонансному спектру нейтронов). Зависимость сечения деления ^{235}U , ^{232}U и ^{238}Pu от энергии нейтрона представлена на рис. 4.

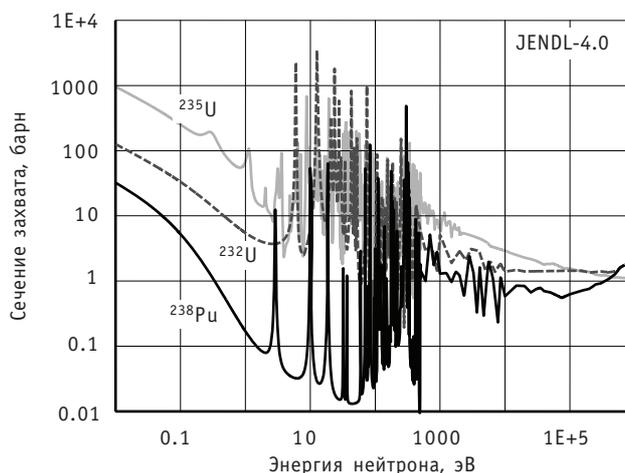


Рис. 4. Зависимость сечения деления ^{235}U , ^{232}U и ^{238}Pu от энергии нейтрона

Можно видеть, что в тепловой области энергий сечение деления ^{232}U существенно ниже, чем ^{235}U . В то же время данные нуклиды характеризуются примерно одинаковым сечением захвата; в частности, для тепловых нейтронов ($V = 2200$ м/с) $\sigma_c (^{232}\text{U}) = 73$ б, $\sigma_c (^{235}\text{U}) = 99$ б. Поэтому в тепловой области энергий размножающие свойства ^{232}U уступают ^{235}U , что подтверждается рис. 5, на котором представлена величина $(\nu_{ef} - 1)$, т.е. число избыточных нейтронов на один поглощенный нейтрон (ν_{ef} – число вторичных нейтронов на один поглощенный нейтрон).

В то время как в тепловой области ^{235}U выглядит предпочтительнее ^{232}U , в резонансной области их размножающие свойства сближаются, а в области быстрых нейтронов ^{232}U уже имеет явное преимущество перед ^{235}U . Поэтому можно полагать, что введение ^{231}Pa с целью повышения выгорания топлива окажется более эффективным в резонансном и быстром спектрах нейтронов.

Что касается ^{238}Pu , то его сечение деления существенно ниже, чем ^{235}U и ^{232}U в тепловой и резонансной областях энергий и находится примерно на одном уровне в быстрой области энергий (рис. 4). Поэтому в тепловой и резонансной областях энергий с точки зрения размножающих свойств ^{238}Pu уступает как ^{235}U , так и

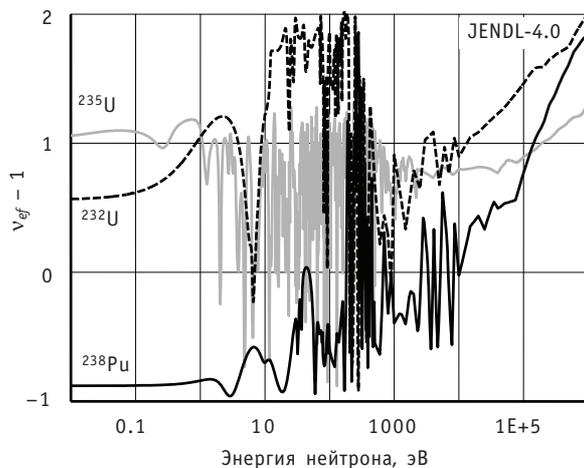


Рис. 5. Энергетическая зависимость числа избыточных нейтронов на один поглощенный нейтрон для ^{235}U , ^{232}U и ^{238}Pu

^{232}U , что наглядно демонстрируется на рис. 5. Кроме того, из рис. 5 видно, что в тепловой области энергий ^{238}Pu является поглотителем, а в резонансной области энергий – умеренно делящимся материалом.

Из вышесказанного следует, что в тепловом и резонансном спектрах нейтронов цепочка, начинающаяся с протактиния, имеет преимущество с точки зрения размножающих свойств входящих в нее нуклидов (а значит, потенциально, с точки зрения длительности кампании и глубины выгорания топлива) перед цепочкой, начинающейся с нептуния.

В перспективных легководных реакторах, например, со сверхкритическими параметрами теплоносителя, в части активной зоны, куда входит теплоноситель, спектр нейтронов близок к спектру нейтронов водо-водяного реактора типа ВВЭР (плотность теплоносителя составляет около 0.72 г/см^3), а в другой части (где нагретый теплоноситель выходит из активной зоны) наблюдается резонансный спектр нейтронов (плотность теплоносителя составляет около 0.1 г/см^3) [10].

В связи с этим проанализируем улучшение нейтронно-физических свойств топливной композиции при введении в нее протактиния ^{231}Pa и нептуния ^{237}Np (по отдельности и совместно) применительно к двум величинам плотности легководного теплоносителя:

- $\gamma_{\text{T/Н}} = 0.72 \text{ г/см}^3$ (характерно для существующих легководных реакторов типа ВВЭР);
- существенно меньшая плотность $\gamma_{\text{T/Н}} = 0.1 \text{ г/см}^3$ (характерно для разрабатываемых в настоящее время реакторов нового поколения с сверхкритическими параметрами теплоносителя).

УЛУЧШЕНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЗАЩИЩЕННОСТИ ТОПЛИВА

Все последующие расчеты, связанные с выгоранием топлива, представляют собой расчеты эквивалентной ячейки, выполненные с помощью расчетного комплекса SCALE-4.3 [11] с использованием библиотеки ядерных данных ENDF/B-V. Рассматривается элементарная ячейка реактора типа ВВЭР-1000 с оксидным топливом в предположении, что конструкционным материалом тепловыделяющих элементов является мартенситная сталь МА956, имеющая следующий состав: 74.5% Fe + 20% Cr + 4.5% Al + 0.5% Ti + 0.5% Y_2O_3 [12].

Топливная решетка с плотностью легководного теплоносителя $\gamma_{т/н} = 0.72 \text{ г/см}^3$

Для условий активной зоны с плотностью теплоносителя $\gamma_{т/н} = 0.72 \text{ г/см}^3$ сравним следующие топливные композиции: топливную композицию на основе ^{235}U и ^{238}U ; топливную композицию, в которой присутствует небольшая добавка ^{231}Pa , что позволяет «задействовать» «нетрадиционную» цепочку нуклидных превращений ($^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{232}\text{U} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow \dots$); а также топливную композицию, в которой присутствует небольшая добавка ^{237}Np , что позволяет «задействовать» «нетрадиционную» цепочку нуклидных превращений ($^{237}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow \dots$).

Изменение коэффициента размножения нейтронов в бесконечной среде (K_∞) в процессе выгорания топлива представлено на рис. 6 и 7 (введение ^{231}Pa и ^{237}Np соответственно).

Из рисунка 6 можно видеть, что при замещении ^{238}U на ^{231}Pa коэффициент размножения нейтронов на начало кампании существенно снижается, т.е. уменьшается первоначальный запас реактивности, который требуется компенсировать. Это

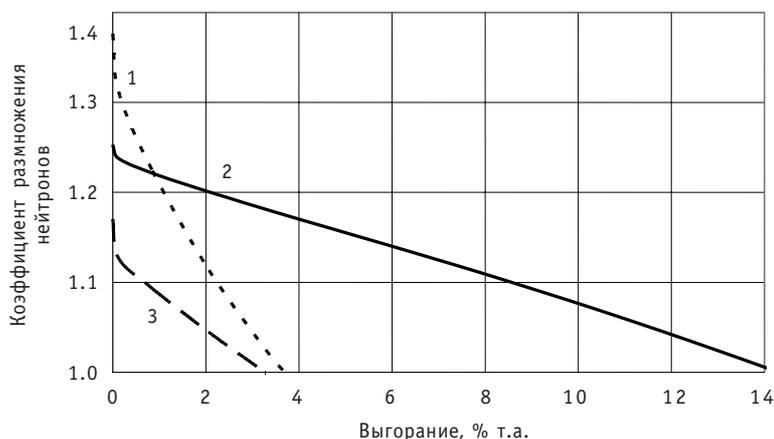


Рис. 6. Влияние введения ^{231}Pa на коэффициент размножения нейтронов (плотность теплоносителя $\gamma_{т/н} = 0.72 \text{ г/см}^3$; малая добавка ^{231}Pa): 1 – 4.4% ^{235}U + 95.6% ^{238}U ; 2 – 19% ^{235}U + 77% ^{238}U + 4% Pa ; 3 – 4.4% ^{235}U + 94.6% ^{238}U + 1% Pa

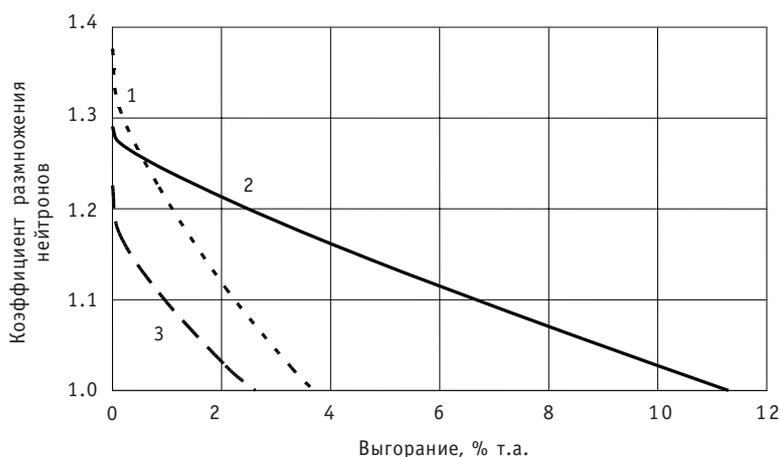


Рис. 7. Влияние введения ^{237}Np на коэффициент размножения нейтронов (плотность теплоносителя $\gamma_{т/н} = 0.72 \text{ г/см}^3$; малая добавка ^{237}Np): 1 – 4.4% ^{235}U + 95.6% ^{238}U ; 2 – 19% ^{235}U + 77% ^{238}U + 4% ^{237}Np ; 3 – 4.4% ^{235}U + 94.6% ^{238}U + 1% ^{237}Np

обусловлено тем, что сечение захвата ^{231}Pa более чем на порядок превосходит сечение захвата ^{238}U (см. рис. 1). Вместе с тем, благодаря значительному сечению захвата ^{231}Pa , наблюдается эффективное воспроизводство двух следующих друг за другом делящихся нуклидов (^{232}U и ^{233}U), и поэтому введение ^{231}Pa в состав топлива приводит к более плавному спаду коэффициента размножения нейтронов в процессе выгорания.

Наличие ^{231}Pa в составе топливной композиции позволяет иметь повышенное обогащение по делящемуся нуклиду (^{235}U) при невысоком начальном запасе реактивности (см. график для топлива ($19\% ^{235}\text{U} + 77\% ^{238}\text{U} + 4\% ^{231}\text{Pa}$) на рис. 6). Данное обстоятельство, а также эффективное воспроизводство делящихся нуклидов (^{232}U и ^{233}U) из протактиния способствуют существенному повышению глубины выгорания топлива (в рассматриваемом случае – до 14% т.а.).

Из сопоставления рис. 6 и 7 следует, что по сравнению с ^{231}Pa введение в состав топливной композиции ^{237}Np оказывается не столь эффективным с точки зрения повышения глубины выгорания. В данном случае увеличение глубины выгорания достигается за счет возможности иметь повышенное обогащение по делящемуся нуклиду (^{235}U) при фиксированном начальном запасе реактивности. Потенциальные возможности цепочки нуклидных превращений ($^{237}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow \dots$) не реализуются, так как второй нуклид цепочки ^{238}Pu слабо делится в рассматриваемом спектре нейтронов, а следующий за ним ^{239}Pu не успевает разделиться (см. рис. 1). Тем не менее, благодаря повышенному обогащению по делящемуся нуклиду, топливная композиция $19\% ^{235}\text{U} + 77\% ^{238}\text{U} + 4\% ^{237}\text{Np}$ позволяет достичь выгорания более 10% т.а.

Преимущество цепочки нуклидных превращений ($^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{232}\text{U} \rightarrow ^{233}\text{U} \rightarrow \dots$) перед цепочкой ($^{237}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow \dots$) в рассматриваемом спектре нейтронов демонстрируется на рис. 8. Сравниваются топливные композиции, содержащие небольшую добавку протактиния (4% ^{231}Pa), небольшую добавку нептуния (4% ^{237}Np) и одновременное введение обоих нуклидов (2% $^{231}\text{Pa} + 2\% ^{237}\text{Np}$). Можно видеть, что замещение ^{237}Np на ^{231}Pa сопровождается повышением глубины выгорания топлива.

Отметим, что во всех вышеприведенных расчетах доля ^{235}U в урановой фракции свежего топлива составляет не более 20%. Соответствующий делящийся материал, согласно рекомендациям МАГАТЭ, является материалом непрямого исполь-

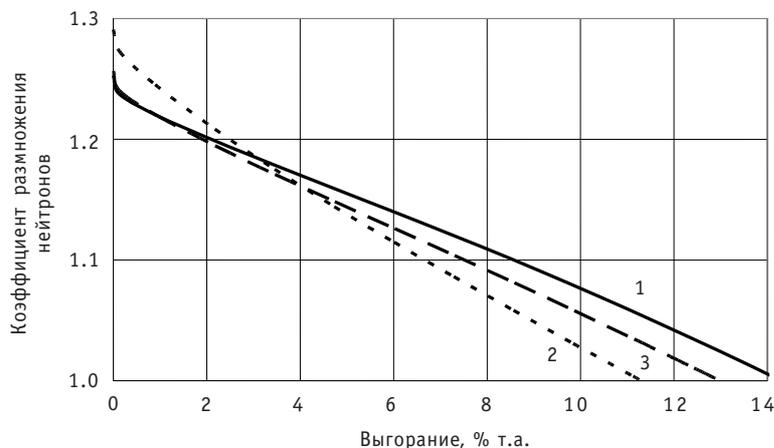


Рис. 8. Влияние введения ^{231}Pa и ^{237}Np на коэффициент размножения нейтронов (плотность теплоносителя $\gamma_{т/н} = 0.72 \text{ г/см}^3$; малая добавка ^{231}Pa и ^{237}Np): 1 – $19\% ^{235}\text{U} + 77\% ^{238}\text{U} + 4\% ^{231}\text{Pa}$; 2 – $19\% ^{235}\text{U} + 77\% ^{238}\text{U} + 4\% ^{237}\text{Np}$; 3 – $19\% ^{235}\text{U} + 77\% ^{238}\text{U} + 2\% ^{231}\text{Pa} + 2\% ^{237}\text{Np}$

зования [8]. Кроме того, как отмечалось выше, введение в состав топливной композиции ^{231}Pa способствует защищенности урановой фракции, а введение ^{237}Np – защищенности плутониевой фракции, которая присутствует в ОЯТ. В частности, для свежего топлива изотопного состава 19% ^{235}U + 77% ^{238}U + 4% ^{237}Np доля ^{238}Pu в плутониевой фракции ОЯТ составляет 43%. Согласно работе [13], гипотетическое ЯВУ имплозивного типа, собранное на основе плутония, содержащего 43% ^{238}Pu , сохраняет работоспособность не более восьми часов.

Таким образом, как урановая, так и плутониевая фракции рассматриваемых топливных композиций являются достаточно защищенными материалами с точки зрения их неконтролируемого распространения.

Увеличим начальную долю делящегося нуклида (^{235}U) в такой мере, чтобы даже при полном замещении ^{238}U на ^{231}Pa коэффициент размножения нейтронов на начало кампании составлял величину порядка 1.1. Расчетным путем выяснено, что для этого потребуется введение в топливо 50% ^{235}U . Изменение коэффициента размножения нейтронов в процессе выгорания при переходе от «традиционной» (на основе ^{238}U) к «нетрадиционным» (на основе ^{231}Pa и ^{237}Np) топливным композициям представлено на рис. 9.

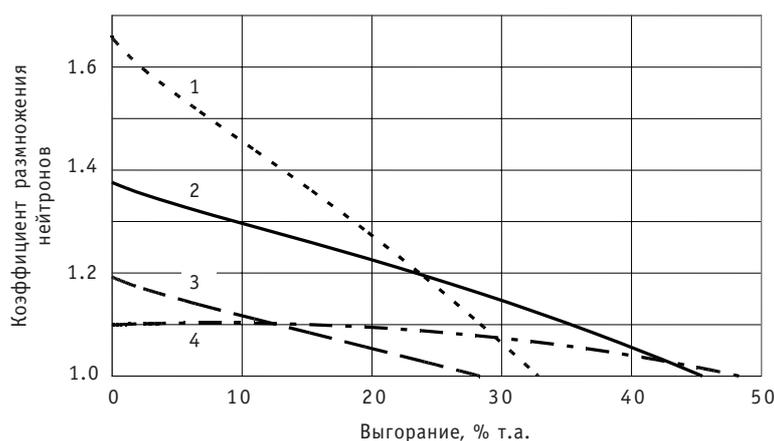


Рис. 9. Достижение сверхглубокого выгорания за счет введения ^{231}Pa и ^{237}Np (плотность теплоносителя $\gamma_{T/H} = 0.72$ г/см³; значительная добавка ^{231}Pa и ^{237}Np): 1 – 50% ^{235}U + 50% ^{238}U ; 2 – 67% ^{235}U + 3% ^{231}Pa + 30% ^{237}Np ; 3 – 50% ^{235}U + 50% ^{237}Np ; 4 – 50% ^{235}U + 50% ^{231}Pa

Как видно из рис. 9, при использовании топлива на основе урана (50% ^{235}U + 50% ^{238}U) начальный запас реактивности весьма существенен: $K_{\infty}(0) \approx 1.65$; при этом достижимое выгорание составляет 33% т.а. Введение ^{231}Pa в топливо приводит к снижению начального запаса реактивности и в то же время к увеличению глубины выгорания топлива. При полной замене ^{238}U на протактиний (50% ^{235}U + 50% ^{231}Pa) коэффициент размножения нейтронов остается практически неизменным и близким к единице на протяжении всей кампании, что свидетельствует о том, что поглощение нейтронов продуктами деления и выгорание имеющихся в топливе делящихся нуклидов почти полностью компенсируются воспроизводством новых делящихся нуклидов из протактиния.

Спектр нейтронов становится резонансным благодаря значительному поглощению в протактинии, существенная часть которого (около 80%) переходит в делящиеся нуклиды (^{232}U и ^{233}U), успевающие выгорать, поддерживая таким образом реактивность и обеспечивая сверхглубокое выгорание, близкое к 48% т.а. (рис. 9).

Введение ^{237}Np в состав топливной композиции также приводит к снижению начального запаса реактивности и более плавному спаду коэффициента размно-

жения нейтронов в процессе выгорания. Однако образующийся из ^{237}Np изотоп плутония ^{238}Pu является поглотителем нейтронов в рассматриваемом спектре нейтронов, т.е. он не способен поддерживать реактивность и обеспечивать повышение выгорания, ухудшая нейтронный баланс цепной реакции.

Если предположить, что реактор имеет загрузку по тяжелому металлу, аналогичную для реактора типа ВВЭР-1000 (около 66 т), и работает на тепловой мощности 3000 МВт (тепл.), данное выгорание соответствует длительности кампании около 30-ти лет.

Топливная решетка с плотностью легководного теплоносителя

$$\gamma_{\text{T/H}} = 0.1 \text{ г/см}^3$$

Применительно к условиям активной зоны реактора с закритическими параметрами теплоносителя ($\gamma_{\text{T/H}} = 0.1 \text{ г/см}^3$) сравним топливную композицию на основе ^{235}U и ^{238}U ; топливную композицию, в которой присутствует ^{231}Pa , что реализует «нетрадиционную» цепочку нуклидных превращений ($^{231}\text{Pa} \rightarrow ^{232}\text{U} \rightarrow ^{233}\text{U} \dots$), и топливную композицию, в которой присутствует ^{237}Np , что реализует «нетрадиционную» цепочку нуклидных превращений ($^{237}\text{Np} \rightarrow ^{238}\text{Pu} \rightarrow ^{239}\text{Pu} \rightarrow \dots$).

Изменение коэффициента размножения нейтронов в процессе выгорания топлива представлено на рис. 10 и 11 (введение ^{231}Pa и ^{237}Np соответственно).

Сопоставление рис. 6 и 10 позволяет заключить, что в топливной решетке с уменьшенной плотностью теплоносителя ($\gamma_{\text{T/H}} = 0.1 \text{ г/см}^3$) спектр нейтронов по своему характеру является резонансным, что способствует улучшению размножающих свойств ^{232}U , а поэтому введение в топливо даже умеренной доли ^{231}Pa (15%) позволяет повысить глубину выгорания почти вдвое.

При ужесточении спектра нейтронов (при переходе от плотности теплоносителя $\gamma_{\text{T/H}} = 0.72 \text{ г/см}^3$ к плотности $\gamma_{\text{T/H}} = 0.1 \text{ г/см}^3$) размножающие свойства ^{238}Pu значительно улучшаются (см. рис. 5), и его можно рассматривать в качестве умеренно делящегося нуклида. Поэтому в более жестком спектре нейтронов ($\gamma_{\text{T/H}} = 0.1 \text{ г/см}^3$) введение ^{237}Np более оправданно (ср. рис. 7 и 11).

Вместе с тем даже при плотности теплоносителя $\gamma_{\text{T/H}} = 0.1 \text{ г/см}^3$ по сравнению с ^{231}Pa при введении ^{237}Np глубина выгорания топлива увеличивается в меньшей степени. Это говорит о том, что даже в резонансном спектре нейтронов цепочка

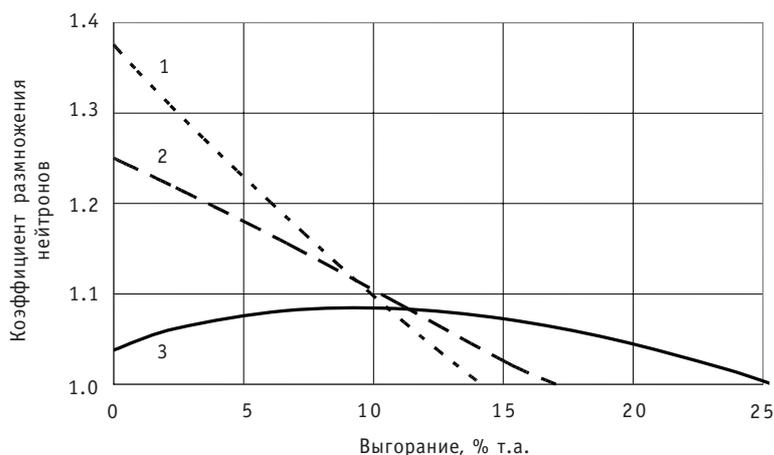


Рис. 10. Влияние введения ^{231}Pa на коэффициент размножения нейтронов (плотность теплоносителя $\gamma_{\text{T/H}} = 0.1 \text{ г/см}^3$; малая добавка ^{231}Pa): 1 – 20% ^{235}U + 80% ^{238}U ; 2 – 19% ^{235}U + 77% ^{238}U + 4% ^{231}Pa ; 3 – 17% ^{235}U + 68% ^{238}U + 15% ^{231}Pa

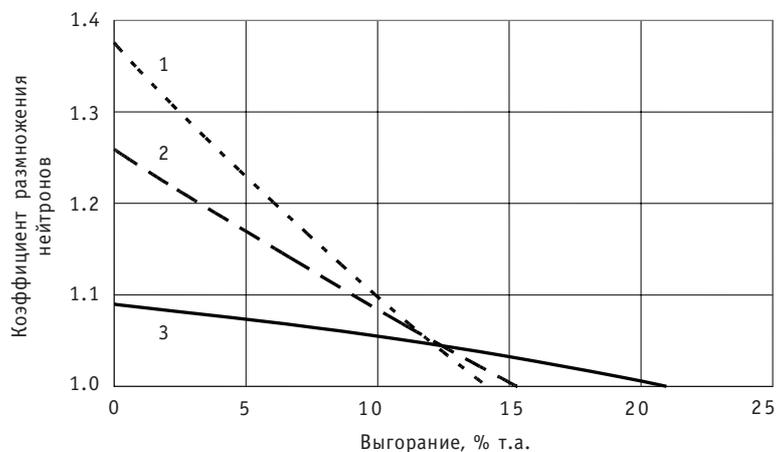


Рис. 11. Влияние введения ^{237}Np на коэффициент размножения нейтронов (плотность теплоносителя $\gamma_{т/н} = 0.1 \text{ г/см}^3$; малая добавка ^{237}Np): 1 – 20% ^{235}U + 80% ^{238}U ; 2 – 19% ^{235}U + 77% ^{238}U + 4% ^{237}Np ; 3 – 17% ^{235}U + 68% ^{238}U + 15% ^{237}Np

нуклидных превращений, начинающаяся с ^{231}Pa , имеет преимущество перед цепочкой, начинающейся с ^{237}Np . Как упоминалось ранее, это связано с тем обстоятельством, что размножающие свойства ^{232}U превосходят размножающие свойства ^{238}Pu как в тепловом, так и в резонансном спектрах нейтронов (см. рис. 5).

Увеличим долю делящегося нуклида (^{235}U) до такого уровня, что даже при полном замещении ^{238}U на ^{231}Pa коэффициент размножения нейтронов на начало кампании составлял бы величину порядка 1.1 (рис. 12).

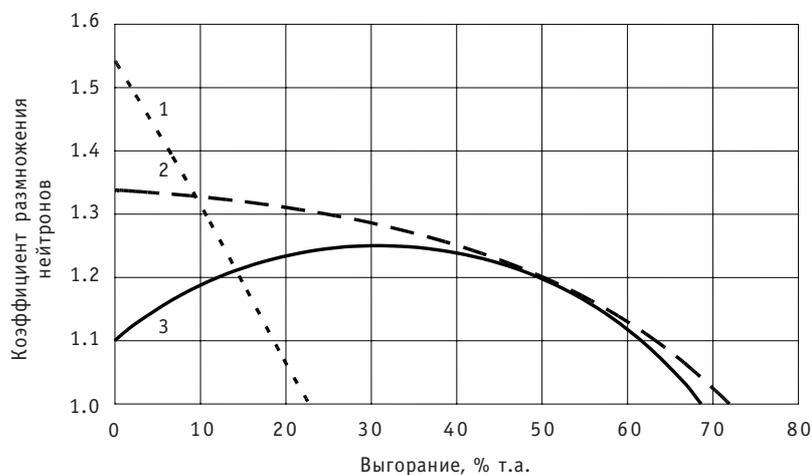


Рис. 12. Достижение сверхглубокого выгорания за счет введения ^{231}Pa и ^{237}Np (плотность теплоносителя $\gamma_{т/н} = 0.1 \text{ г/см}^3$; значительная добавка ^{231}Pa и ^{237}Np): 1 – 30% ^{235}U +70% ^{238}U ; 2 – 30% ^{235}U +70% ^{237}Np ; 3 – 30% ^{235}U +70% ^{231}Pa

При значительной доле ^{231}Pa (или ^{237}Np) в составе топливной композиции спектр нейтронов становится быстрорезонансным, и происходит дальнейшее улучшение размножающих свойств протактиниевой и нептуниевой цепочек, что позволяет поддерживать критичность до достижения очень глубокого выгорания ~ 70% т.а. (рис. 12).

ВЫВОДЫ

1. Обосновано использование ^{231}Pa и ^{237}Np в качестве «выгорающих» поглотителей, особенность которых состоит в том, что они позволяют не только снизить начальный запас реактивности, но и существенно повысить глубину выгорания топлива.

2. Использование ^{231}Pa и ^{237}Np в тепловом и резонансном спектрах нейтронов позволяет достигать весьма глубокого выгорания (около 30% т.а.).

Литература

1. Burnup – Wikipedia, the free encyclopedia [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://en.wikipedia.org/wiki/Burnup>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
2. Шмелев А.Н., Куликов Е.Г., Куликов Г.Г. // Повышение глубины выгорания топлива легководных реакторов при введении в его состав протактиния ^{231}Pa // Ядерная физика и инжиниринг (в печати).
3. Грачев А.Ф., Маершин А.А., Голованов В.Н., Цыканов В.А., Бычков А.В., Шишалов О.В. // Опыт и перспективы использования твэлов на основе виброуплотненного оксидного топлива/Международная научно-техническая конференция «Атомная энергетика и топливные циклы» (Москва-Дмитровград, Россия, 1 – 5 декабря, 2003 г.).
4. De Volpi A. // Denaturing Fissile Materials. Progress in Nuclear Energy. – 1982. – V. 10. – № 2. – P. 161-220.
5. Райли Д., Энслин Н., Смит Х. и Крайнер С. Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов. – М.: Бином, 2000.
6. Mark J.C. // Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium. Science and Global Security, 1993. Vol. 4. P. 111-128.
7. Критическая масса – Wikipedia, the free encyclopedia [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Критическая_масса, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
8. The Structure and content of agreements between the Agency and States required in connection with the Treaty on the non-proliferation of nuclear weapons. INFCIRC/153 (Corrected). – IAEA, 2007.
9. Kessler G. Plutonium Denaturing by ^{238}Pu // Nuclear Science and Engineering. – 2007. – V. 155. – P. 53-73.
10. Куликов Е.Г., Шмелев А.Н., Куликов Г.Г. Нейтронно-физические характеристики (^{233}U - ^{238}U)-топлива в легководном реакторе со сверхкритическими параметрами теплоносителя // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 2. – С. 27-38.
11. Цветков П.В. Объединенный одномерный расчет изменения состава топлива в процессе облучения в реакторе и радиационных характеристик облученного топлива с помощью комплекса программ SCALE (версия 4.3). – М.: 1998.
12. INCOLOY MA 956 Mechanical Alloying – Mechanical Engineer [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: <http://www.pageranknet.com/mechanical-engineer/mechanical-engineer-archives/52-INCOLOY-MA-956-Mechanical-Alloying.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
13. Куликов Е.Г., Шмелев А.Н., Апсэ В.А., Куликов Г.Г. Расчетные модели для количественной оценки защищенности делящихся материалов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 2. – С. 3-14.

Поступила в редакцию 20.09.2011

in the containment model; steam-water mixture pressure of atmospheric pressure 650 кPa; and heat flux density of 322 KW/m². Given are comparative analysis results for obtained experimental and calculated heat transfer values; closing correlations are proposed.

УДК 532.526.4: 621.039.534

Investigation of Supercritical Parameters Water Flow Problem by the ANSYS-CFX and Star-CD Codes \I.A. Chusov, A.S. Shelegov, V.I. Slobodchuk, V. Ukraintsev, A.N. Yarkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 1 table, 13 illustrations. – References, 8 titles.

Results of analysis of evaluations made by codes ANSYS-CFX and STAR-CD for water flow with supercritical parameters with experimental data of the State Research Center «Institute of Physics and Power Engineering» are presented. Evaluations were carried out with the use of five model of turbulence. It is shown that calculation results are in satisfactory accordance with experimental data. The problem of forming the M-type profile of velocity is considered separately.

УДК 621.039.54

Increase of Burn-up and Proliferation Protection of Light Water Reactors Fuel at Combined Introduction of ²³¹Pa and ²³⁷Np into its Composition \G.G. Kulikov, E.G. Kulikov, E.F. Kryuchkov, A.N. Shmelev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 12 illustrations. – References, 13 titles.

It is founded the use of nuclides ²³¹Pa and ²³⁷Np in fuel composition of light water reactors as burnable absorbers, which allow us to reduce initial reactivity excess, increase essentially fuel lifetime and reach ultra high fuel burn-up as well strengthen proliferation protection of fuel.

Introduce of ²³⁷Np into fuel composition would allow decreasing requirements of ²³¹Pa content which is difficult of access in considerable amounts. While ²³⁷Np is in spent fuel of nuclear power plants and at present time is not used and is a problem in respect to its storage and processing. So it is expedient to review ways of its involving into nuclear fuel cycle.

УДК 621.039.543.4

Introduction of Reprocessed Uranium into Fuel Composition of Light-Water Reactors as a Protective Measure Against Proliferation \A.Yu. Smirnov, V.A. Apse, V.D. Borisevich, G.A. Sulaberidze, A.N. Shmelev, A.A. Dudnikov, E.A. Ivanov, V.A. Nevinitza, N.N. Ponomarev-Stepnoi; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 15 titles.

The paper presents a physical principle for development of advanced LWR fuel with inherent resistance to unauthorized usage and proliferation of uranium-based nuclear materials. Key point of the principle consists in the use of reprocessed uranium extracted from spent fuel in fabrication of fresh fuel assemblies for export deliveries. Introduction of reprocessed uranium into fresh uranium fuel compositions can complicate substantially any diversions of nuclear materials from fuel assemblies thanks to the presence of uranium isotope ²³²U in reprocessed uranium. Any attempts of uranium re-enrichment up to the weapon-grade level will fail because of rapid increase of ²³²U content and its high-energy gamma-radiation. This technical measure, in combination with restricted accessibility of isotope separation technologies concentrated in the International nuclear technology centers and unification of requirements to dose rates of ionizing radiation from fresh fuel assemblies, can reduce significantly the proliferation risk related to export deliveries of low-enriched uranium fuel.

УДК 621.039.52.034.3

Studies of Electromagnetic Suspension of Turbomachine's Rotor for Nuclear Power Plant with High Temperature Reactor and Gas-Turbine Cycle \N.G. Kodochigov, S.M. Dmitriev, I.V. Drumov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 14 titles.

Prospects of applying of a direct gas-turbine cycle for nuclear power plants with high-temperature gas-cooled reactors are analyzed in this paper. Here are described the basic characteristics and requirements of a design, which provide a high level к.п.д of such type of reactors with direct gas-turbine cycle and its advantage in comparison with similar designs with steam-turbine installations. Data about development of the technology in the countries, which design and maintain high-temperature gas-cooled reactors, are cited.