

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»

АО «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ —

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

имени А. И. ЛЕЙПУНСКОГО»

ФЭИ–3290

В. Ю. СТОГОВ

**ИЗМЕНЕНИЕ ВЕКТОРА ПЛУТОНИЯ
В БЫСТРОМ РЕАКТОРЕ**

Обнинск – 2020

УДК 621.039.54

Стогов В.Ю. Изменение вектора плутония в быстром реакторе : Препринт ФЭИ–3290. Обнинск: ГНЦ РФ – ФЭИ, 2020. 13 с.

Описаны процессы изменения изотопного состава плутония в нейтронном потоке быстрого реактора. Оценены условия получения необходимой доли делящихся изотопов в выгружаемом плутонии для его использования в реакторе на тепловых нейтронах.

Ключевые слова: легководный реактор, реактор на быстрых нейтронах, изотопный состав плутония, регулирование изотопного состава

Stogov V. Yu. *The change of the plutonium vector in a fast reactor*. Preprint FEI–3290. Obninsk, IPPE Publ., 2020. 13 p.

Plutonium isotopes evolution under neutron flux in fast reactor is investigated. Conditions for obtaining desired isotopic content for using in PWR are gave.

ВВЕДЕНИЕ

В работе описано изменение вектора плутония, полученного из тепловых реакторов, при облучении в быстром реакторе и выбрано направление оптимизации этого процесса с точки зрения возвращения облученного плутония в тепловой реактор.

Известно, что для реакторов на тепловых нейтронах существует проблема вторичного использования нарабатываемого из урана плутония [1]. Одним из возможных вариантов взаимодействия быстрых и тепловых реакторов в области использования топлива является пропускание плутония из тепловых через быстрые и возврат его обратно в тепловые. Следует отметить, что передачу плутония рассматривал ещё Энрико Ферми: «Помимо непосредственного производства энергии эти большие установки могут также вырабатывать плутоний. Он будет извлекаться и передаваться на малые установки для использования в них в качестве первичного топлива вместо урана» (цитируется по [2], с.353).

Проблема повторного использования плутония в тепловых реакторах вызывается уменьшением доли нечетных нуклидов в спектре теплового реактора. В быстрых реакторах возможно повышение доли нечетных изотопов, что позволяет вернуть такой плутоний в тепловые реакторы. Этот процесс получил название облагораживания. Схематично однократный процесс облагораживания, который рассмотрен в данной работе, изображен на рисунке 1.

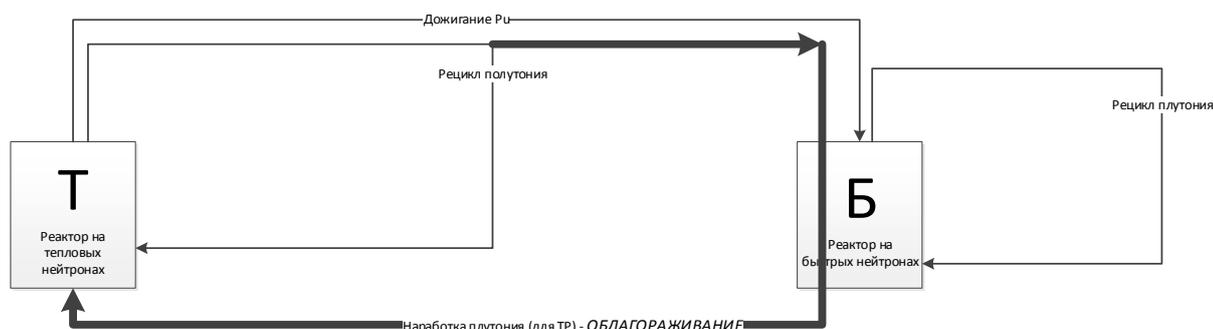


Рис. 1. Место однократного облагораживания в двухкомпонентной ядерной энергетике (процесс выделен толстой линией)

Потенциальные потребности для нужд энергетики рассмотрены в [3]. В работе [4] приведен пример облагораживания в реакторе Астрид для условий Франции. Некоторые практические результаты для российских условий приведены в докладе [5].

Для реализации этого процесса важными вопросами, на которые можно ответить используя аналитические методы, являются:

а) принципиальная возможность облагораживания, необходимые условия его реализации;

б) основные физические процессы и зависимости, временные характеристики, определяющие встраиваемость облагораживания в режимы работы существующих установок;

в) свойства, которые можно использовать для получения оптимальных результатов.

Методическая особенность работы заключается в использовании аналитических методов для решения уравнений. Хотя в этом случае учесть все известные факторы реально не удастся, такая техника исследований позволяет на аналитических моделях получить фундаментальные зависимости.

В отличие от результатов численных расчётов, получаемые зависимости не являются результатом неполной индукции или аппроксимацией по случайным параметрам, как это порой бывает, а отражают физическую сущность предмета, выраженную в математической модели.

Аналитические методы не призваны подменить собой численное моделирование. Они позволяют адекватно употреблять расчётные результаты. Аналитическое представление позволяет обоснованно интерпретировать последовательности результатов, полученных численными методами, преобразуя их в зависимости, необходимые для практики.

Потенциал же собственно аналитических представлений по объёму и простоте получения численных результатов, необходимых для анализа всей предметной области, при этом существенно превосходит возможности численного моделирования. При этом предметная область покрывается непрерывным сплошным образом, не оставляя неисследованных мест. Аналитика раскрывает содержание всего поля значений, а не только отдельных точек, которые описываются численным моделированием.

Сокращения и определения, принятые в данной работе:

- делящиеся изотопы — Pu-239, Pu-241;
- доля делящихся изотопов — суммарная доля Pu-239 и Pu-241 в плутонии;
- доля плутония — доля ядер плутония в смеси с ураном для совместно перерабатываемого топлива;
- ЯЭ — ядерная энергетика;
- плутониевый вектор — доли изотопов плутония в плутонии;
 - эфф. лет (эффективных лет) — время эксплуатации в годах при работе на 100% мощности.

1. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ, ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

Организация процесса облагораживания в быстром реакторе возможна как с многократным рециклированием плутония, полученного из теплового реактора, так и с однократным пропуском плутония через быстрый реактор.

Моделировать будем поведение изотопов в топливе, которое перерабатывается целиком и не разделяется на отдельные отличающиеся части. В существующих концепциях быстрых реакторах такой минимальной частью может является твэл, в котором топливо может находиться в активной части, торцевом экране, но рассматривать мы его будем как единое целое состоящие из изотопов. Будем считать, что в начальный момент времени все изотопы загружаются вместе, хотя конструктивно они могут загружаться в разные места твэла. Рассматриваемое топливо может объединять не одну ТВС. Таким образом, в нашей модели будем рассматривать один, целый материал, состоящий из изотопов.

Данная работа сконцентрирована на задаче улучшения состава плутония при облучении плутония в течении одной кампании ТВС. Для этого случая подходит традиционная форма системы уравнений изотопной кинетикой. Для простоты ограничимся урезанным составом плутония из четырех изотопов Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242 и будем учитывать наличие U-238.

Эффективные сечения будем находить по области совместно обрабатываемых материалов с учётом их вклада в соответствующие скорости реакций. Условия облучения в быстром энергетическом реакторе в достаточной мере стабильны, поэтому можно нейтронные сечения усреднить по спектру реального энергетического реактора и использовать односкоростное приближение. Пренебрежем иными реакциями кроме деления и захвата. Уравнения для скоростей изменения количества изотопов в этом случае будут выглядеть так:

$$\begin{aligned} N'_{U-238} &= -\varphi(\sigma_c^{U-238} + \sigma_f^{U-238})N_{U-238} \\ N'_{Pu-239} &= \varphi\sigma_c^{U-238}N_{U-238} - \varphi(\sigma_c^{Pu-239} + \sigma_f^{Pu-239})N_{Pu-239} \\ N'_{Pu-240} &= \varphi\sigma_c^{Pu-239}N_{Pu-239} - \varphi(\sigma_c^{Pu-240} + \sigma_f^{Pu-240})N_{Pu-240} \\ N'_{Pu-241} &= \varphi\sigma_c^{Pu-240}N_{Pu-240} - \varphi(\sigma_c^{Pu-241} + \sigma_f^{Pu-241})N_{Pu-241} \\ N'_{Pu-242} &= \varphi\sigma_c^{Pu-241}N_{Pu-241} - \varphi(\sigma_c^{Pu-242} + \sigma_f^{Pu-242})N_{Pu-242} \end{aligned} \quad (1.1)$$

где N_i — количество ядер i -го изотопа;

N'_i — производная по времени количества ядер i -го изотопа;

σ_c^i — сечение захвата i -го изотопа;

σ_f^i — сечение деления i -го изотопа;

φ — нейтронный поток.

Составляющие скорости изменения количества ядер имеют вполне традиционные компоненты: $-\varphi(\sigma_c^i + \sigma_f^i)N_i$ — скорость увода изотопа i за счёт реакции захвата и деления, $\varphi\sigma_c^{i-1}N_{i-1}$ — скорость образования изотопа i за счёт захвата на родительском изотопе $i-1$.

Для получения решения необходимы начальные условия. Определим их в начальный момент времени $t = 0$. Обозначим их таким образом:

$$\begin{aligned} N_{\text{U-238}}(0) &= N_{\text{U-238}}^0 \\ N_{\text{Pu-239}}(0) &= N_{\text{Pu-239}}^0 \\ N_{\text{Pu-240}}(0) &= N_{\text{Pu-240}}^0 \\ N_{\text{Pu-241}}(0) &= N_{\text{Pu-241}}^0 \\ N_{\text{Pu-242}}(0) &= N_{\text{Pu-242}}^0 \end{aligned} \quad (1.2)$$

Вполне естественно, что все величины количества ядер, сечения и потоков в формулах (1.1) и (1.2) в математическом смысле положительны.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Решение системы (1.1) с начальными условиями (1.2) можно записать в виде формулы (2.1) первоначальный вариант которой был предложен Бейтеманом [6]:

$$N_i = \sum_{m=1}^i \left(N_{i-m+1} \left(\prod_{j=1}^{m-1} \sigma_c^j \right) \sum_{k=1}^m \left(e^{-\sigma_{cf}^k t} / \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^m (\sigma_{cf}^l - \sigma_{cf}^k) \right) \right). \quad (2.1)$$

Здесь нумерация изотопов произведена согласно строкам в (1.1): $i = 1$ это U-238, $i = 2$ — Pu-239, $i = 3$ — Pu-240, $i = 4$ — Pu-241, $i = 5$ — Pu-242, σ_{cf}^k — сечение «увода» k -го изотопа $\sigma_c^k + \sigma_f^k$, σ_c^j — сечение захвата j -го изотопа с образованием $(j+1)$ -го изотопа, произведение для индексов не соответствующих налагаемым условиям равно 1, т. е. $\prod_{i=3}^1 f(i) = 1$.

Вид решения системы (1.1) для нас не столь важен, тем более что нас больше интересует не собственно количество ядер, а доля делящихся изотопов в плутонии. Однако можно заметить, что в решении есть члены с экспонентой в степени суммы всех сечений увода.

Как было отмечено в постановочной части работы, важна принципиальная возможность процесса. Для начала определим предел, к которому стремится доля делящихся материалов при бесконечном времени облучения.

По определению доля делящихся изотопов Dd :

$$Dd = \frac{N_{\text{Pu-239}} + N_{\text{Pu-241}}}{N_{\text{Pu-239}} + N_{\text{Pu-240}} + N_{\text{Pu-241}} + N_{\text{Pu-242}}} \quad (2.2)$$

Для того чтобы определить скорость изменения доли делящихся изотопов находим производную. Используем правило производной от дроби:

$$Dd' = \left(\frac{N_{\text{Pu-239}} + N_{\text{Pu-241}}}{N_{\text{Pu-239}} + N_{\text{Pu-240}} + N_{\text{Pu-241}} + N_{\text{Pu-242}}} \right)' = \left(\frac{u}{v} \right)' = \frac{u'v - uv'}{v^2} \quad (2.3)$$

Учитываем, что производная от суммы функций $(\sum N_i)'$ это сумма производных функций $(\sum N_i')$. Выражения для N_i' берем из (1.1). Получаем, что скорость облагораживания:

$$\begin{aligned} & \varphi \left[\frac{\left(\sigma_c^{\text{U}^{238}} N_{\text{U}^{238}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{239}} N_{\text{Pu}^{239}} + \sigma_c^{\text{Pu}^{240}} N_{\text{Pu}^{240}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{241}} N_{\text{Pu}^{241}} \right) (N_{\text{Pu}^{240}} + N_{\text{Pu}^{242}})}{\left(N_{\text{Pu}^{239}} + N_{\text{Pu}^{240}} + N_{\text{Pu}^{241}} + N_{\text{Pu}^{242}} \right)^2} - \right. \\ & \left. - \frac{\left(-\sigma_{cf}^{\text{Pu}^{240}} N_{\text{Pu}^{240}} + \sigma_c^{\text{Pu}^{239}} N_{\text{Pu}^{239}} + \sigma_c^{\text{Pu}^{241}} N_{\text{Pu}^{241}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{242}} N_{\text{Pu}^{242}} \right) (N_{\text{Pu}^{239}} + N_{\text{Pu}^{241}})}{\left(N_{\text{Pu}^{239}} + N_{\text{Pu}^{240}} + N_{\text{Pu}^{241}} + N_{\text{Pu}^{242}} \right)^2} \right] = \\ & = \varphi \left\{ \left(\sigma_c^{\text{U}^{238}} \frac{(1-x)}{x} + \sigma_c^{\text{Pu}^{240}} d_{\text{Pu}^{240}} - \sum_{i=\text{делящиеся}} \sigma_{cf}^i d_i \right) (1-Dd) - \right. \\ & \left. - \left(\sum_{i=\text{делящиеся}} \sigma_c^i d_i - \sum_{i=\text{неделящиеся}} \sigma_{cf}^i d_i \right) Dd \right\}, \quad (2.4) \end{aligned}$$

где x — доля плутония в тяжелых ядрах, $\sum_{i=\text{деляющиеся}} \sigma_c^i d_i$ — индекс захвата на делящихся изотопах (перевода в неделящиеся), $\sum_{i=\text{деляющиеся}} \sigma_{cf}^i d_i$ — индекс увода делящихся изотопов, $\sum_{i=\text{неделяющиеся}} \sigma_{cf}^i d_i$ — индекс увода неделящихся изотопов.

Предельное значение, к которому стремится доля делящихся изотопов по мере выгорания, находится по правилу Лапиталя, применённому к формуле (2.2).

Анализ показывает, что при разном соотношении сечений выражение для предельного значения доли делящихся ядер в плутонии при бесконечном времени будут отличаться. Для традиционных компоновок быстрых реакторов, соотношение между сечениями следующее:

$$\sigma_{cf}^{\text{Pu-241}} > \sigma_{cf}^{\text{Pu-239}} > \sigma_{cf}^{\text{Pu-240}} > \sigma_{cf}^{\text{Pu-242}} > \sigma_{cf}^{\text{U-238}}. \quad (2.5)$$

Обозначим Dd_∞ как предельную долю делящихся ядер. Тогда на основе уравнений (1.1), учитывая соотношение (2.5) можно найти предел для выражения (2.2):

$$\begin{aligned} Dd_\infty &= \left(\sigma_c^{\text{Pu}^{239}} \sigma_c^{\text{Pu}^{240}} + (\sigma_{cf}^{\text{U}^{238}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{240}})(\sigma_{cf}^{\text{U}^{238}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{241}}) \right) \times \left(\sigma_{cf}^{\text{U}^{238}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{242}} \right) / \\ & \quad / \left[\left(\sigma_{cf}^{\text{U}^{238}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{240}} \right) \left(\sigma_{cf}^{\text{U}^{238}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{241}} \right) \left(\sigma_{cf}^{\text{U}^{238}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{242}} \right) - \right. \\ & \quad \left. - \sigma_c^{\text{Pu}^{239}} \left(\left(\sigma_{cf}^{\text{U}^{238}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{241}} \right) \left(\sigma_{cf}^{\text{U}^{238}} - \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{242}} \right) + \sigma_c^{\text{Pu}^{240}} \left(\sigma_c^{\text{Pu}^{241}} - \sigma_{cf}^{\text{U}^{238}} + \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{242}} \right) \right) \right] = \\ & = \frac{\left(\sigma_c^{\text{Pu}^{239}} \sigma_c^{\text{Pu}^{240}} + \sigma_{8-cf}^{\text{Pu}^{240}} \sigma_{8-cf}^{\text{Pu}^{241}} \right) \sigma_{8-cf}^{\text{Pu}^{242}}}{\sigma_{8-cf}^{\text{Pu}^{240}} \sigma_{8-cf}^{\text{Pu}^{241}} \sigma_{8-cf}^{\text{Pu}^{242}} - \sigma_c^{\text{Pu}^{239}} \left(\sigma_{8-cf}^{\text{Pu}^{240}} \sigma_{8-cf}^{\text{Pu}^{241}} + \sigma_c^{\text{Pu}^{240}} \left(\sigma_c^{\text{Pu}^{231}} - \sigma_{8-cf}^{\text{Pu}^{242}} \right) \right)}, \quad (2.6) \end{aligned}$$

где σ_{8-cf}^k — разностное сечение накопления k -го изотопа в смеси с U-238, $\sigma_{8-cf}^k = \sigma_{cf}^{\text{U-238}} - \sigma_{cf}^k$.

Подстановка сечений в формулу (2.6) позволяет определить величину доли делящихся изотопов в композиции, к которой сходится процесс выгорания.

Для практики важно, начнётся ли процесс облагораживания в начальный момент. Условие для этого можно выразить так:

$$N'_{\text{Pu-239}} + N'_{\text{Pu-241}} \geq N'_{\text{Pu-240}} + N'_{\text{Pu-242}}. \quad (2.7)$$

Чтобы найти условия выполнения неравенства, надо подставить в соотношения (2.7) выражения из системы (1.1). Отсюда находим предельное начальное содержание плутония в топливе x_{max} , ниже которого идёт процесс облагораживания для текущего состава плутония:

$$x_{\text{max}} = \left[1 + \frac{d_{\text{Pu}^{239}} \left(\sigma_c^{\text{Pu}^{239}} + \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{239}} \right) - d_{\text{Pu}^{240}} \left(\sigma_c^{\text{Pu}^{240}} + \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{240}} \right) + d_{\text{Pu}^{241}} \left(\sigma_c^{\text{Pu}^{241}} + \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{241}} \right) - d_{\text{Pu}^{242}} \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{242}}}{\sigma_c^{\text{U}^{238}}} \right]^{-1} \quad (2.8)$$

где d_i — ядерные доли i -го изотопа плутония в плутонии.

Выражение (2.8) можно получить и приравняв нулю скорость облагораживания в (2.4).

3. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Предельные случаи

Тенденции, показанные в этом разделе, верны при соотношениях сечений согласно выражению (2.5). Поведения конкретной смеси изотопов будет линейной комбинацией демонстрируемых ниже временных зависимостей.

Вклад в долю делящихся изотопов U-238 (с учётом условий (2.5)) приведено на рис. 2. Из рисунка видно, что со временем по мере накопления флюенса состав стремится к величине, определяемой формулой (2.6). Доля нечётных изотопов в начальный момент соответствует чистому Pu-239.

Вклады отдельных изотопов плутония в поведение доли нечётных изотопов приведено на рис. 3.

На рис. 3 не показан предел изменения доли нечётных изотопов при бесконечном времени облучения, который равен 0. Единственный изотоп, наличие которого может вызвать временный рост искомого функционала, — это Pu-240.

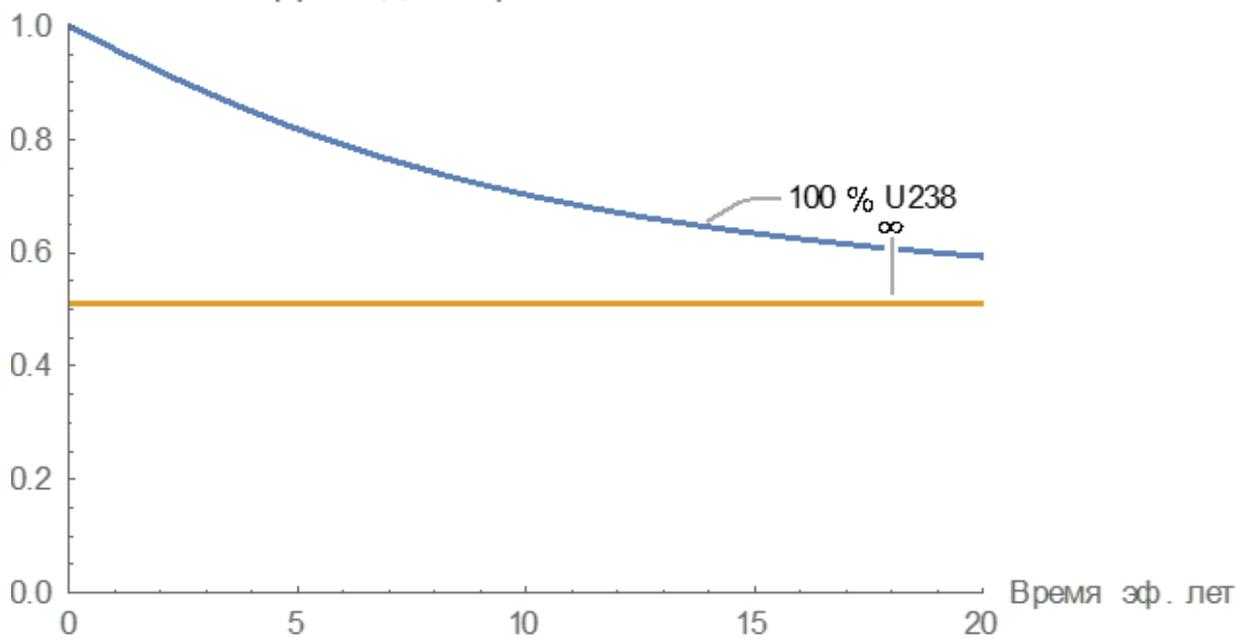


Рис. 2. Изменение доли нечётных изотопов от времени при облучении U-238 (условия облучения — ЗМО БН-800 с торцевым экраном). Стационарное состояние (обозначенное ∞) соответствует формуле(2.6)

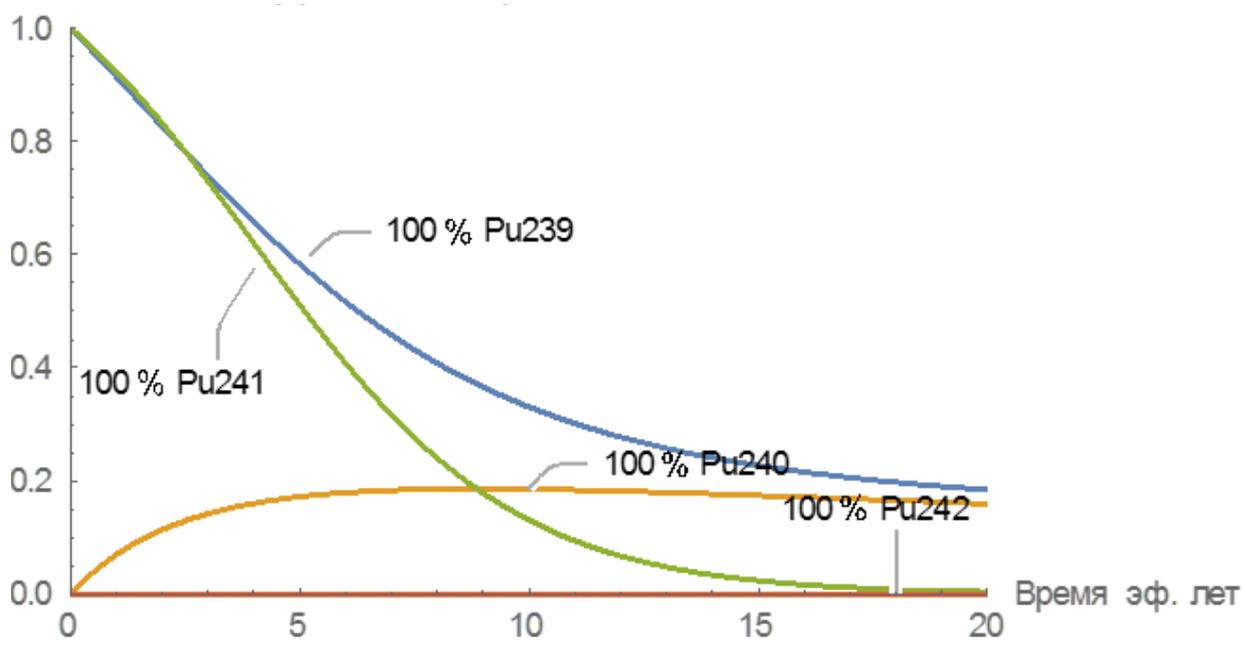


Рис. 3. Изменение доли нечётных изотопов от времени для отдельных изотопов плутония (условия облучения — ЗМО БН-800 с торцевым экраном). Для Pu-242 везде 0

3.2 Оценки для плутония из PWR в условиях БН-800

Для примера возьмём плутоний из тепловых реакторов на МОХ топливе энергоснабжением 45 ГВт/тU [7]. Его вектор: Pu-239 / Pu-240 / Pu-241 / Pu-242 / Pu-238=37 / 32 / 16 / 12 / 4 (%). Для простоты исключим Pu-238. В этом составе доля нечётных изотопов составляет 54,6 %. Будем облучать полученный состав в ЗМО БН-800 [8]. Стационарная доля делящегося плутония составит по формуле (2.6) приблизительно 51 %. Максимальная доля плутония с учётом торцевых экранов, при которой в начальный момент начинается облагораживание, равна 22,2 % (2.8). Начальная скорость увеличения доли делящихся изотопов, согласно (2.4), приведена в таблице 1.

Таблица 1 демонстрирует сильную зависимость начальной скорости изменения доли от содержания плутония в смеси с U-238. Понятно, что с приближением доли плутония к предельной, определяемой формулой (2.8), скорость изменения стремится к 0.

Таблица 1. Скорость изменения доли нечётных изотопов (скорость облагораживания)

Доля плутония	Скорость, год ⁻¹
0,1	0,116
0,2	0,006

Поведение доли нечётных изотопов плутония со временем для разных начальных долей плутония приведено на рис. 4.

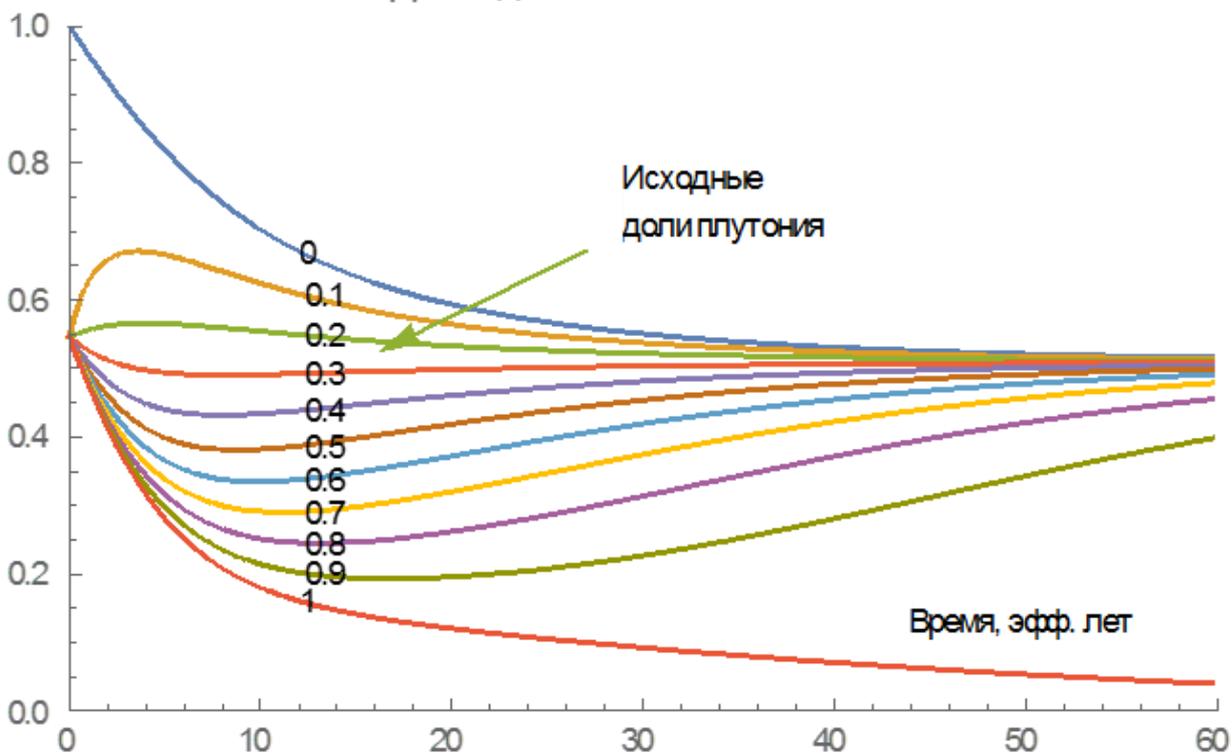


Рис. 4. Изменение доли делящихся изотопов от времени при варьировании исходной доли плутония в смеси с U-238

Рисунок 4 демонстрирует возможность получения высокой доли нечётных изотопов (более 65 %) за сравнительно малое время (менее 4 лет), для чего необходимо обеспечить малые доли плутония (порядка 10 %) в топливе. Причина эффекта заключается в наличии заметного количества Pu-240 в исходном плутонии.

ВЫВОДЫ

Поведение доли нечётных изотопов имеет сложную временную зависимость как от начального состава плутония, так и доли плутония в смеси с U-238.

Проведенные исследования показывают (в рамках упрощенной модели) возможность облагораживания при доле плутония в смеси с U-238 меньше:

$$x_{\max} = \left[1 + \frac{d_{\text{Pu}^{239}} \left(\sigma_c^{\text{Pu}^{239}} + \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{239}} \right) - d_{\text{Pu}^{240}} \left(\sigma_c^{\text{Pu}^{240}} + \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{240}} \right) + d_{\text{Pu}^{241}} \left(\sigma_c^{\text{Pu}^{241}} + \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{241}} \right) - d_{\text{Pu}^{242}} \sigma_{cf}^{\text{Pu}^{242}}}{\sigma_c^{\text{U}^{238}}} \right]^{-1},$$

где d_i — ядерные доли i -го изотопа плутония в исходном плутонии; σ_c^i — сечение захвата i -го изотопа; σ_{cf}^i — сумма сечений захвата и деления i -го изотопа;

Для условий реактора типа БН-800 и плутония из MOX PWR облагораживание начинается при содержании плутония менее 22 %.

Скорость облагораживания V_{Dd} (изменение доли делящихся изотопов) описывается формулой

$$V_{Dd} = \left\{ \left(\sigma_c^{\text{U}^{238}} \frac{(1-x)}{x} + \sigma_c^{\text{Pu}^{240}} d_{\text{Pu}^{240}} - \sum_{i=\text{делящиеся}} \sigma_{cf}^i d_i \right) (1-Dd) - \left(\sum_{i=\text{делящиеся}} \sigma_c^i d_i - \sum_{i=\text{неделяющиеся}} \sigma_{cf}^i d_i \right) Dd \right\},$$

где x — доля плутония в тяжелых ядрах, $\sum_{i=\text{делящиеся}} \sigma_c^i d_i$ — индекс захвата на делящиеся

лящихся изотопах (перевода в неделящиеся), $\sum_{i=\text{делящиеся}} \sigma_{cf}^i d_i$ — индекс увода де-

лящихся изотопов, $\sum_{i=\text{неделящиеся}} \sigma_{cf}^i d_i$ — индекс увода неделящихся изотопов.

Для условий реактора типа БН-800 и плутония из MOX PWR при содержании плутония 10 % начальная скорость облагораживания составит $0,116 \text{ год}^{-1}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atomic Energy for Power. The George Westinghouse Centennial Forum. Science and Civilization. — The Future of Atomic Energy (May 1946).
2. Энрико Ферми. Научные труды. Том II. М. : Наука. 1971.
3. Алексеев П.Н., Алексеев С.В., Андрианова Е.А. и др. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом топливном цикле / Под ред. Н. Н. Пономарева-Степного. М. : Техносфера, 2016.
4. Lemasson D., Le Mer J., Garzenne C. Scenario of a Symbiotic Nuclear Fleet Composed of PWRs and SFRs // ICONE20, Anaheim, USA, July 30 — August 3, 2012.
5. Бурьевский И.В., Гулевич А.В., Декусар В.М. и др. Возможность «облагораживания» плутония в БН-800 // Нейтроника 2019, Обнинск.
6. Bateman H. Solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations // Proc. Cambridge Philos.Soc. 1910, v.15, pp. 423—427.
7. MOX, Mixed Oxide Fuel — World Nuclear Association. <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx>.
8. Transient and accident analysis of a BN-800 type LMFR with near zero void effect. Final report on an international benchmark programme supported by the International Atomic Energy Agency and the European Commission. 1994-1998. IAEA-TECDOC-1139. IAEA, May.

Подписано к печати 11.11.2020. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,5.
Тираж 35 экз. Заказ № 225.

Отпечатано в ОНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»