

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСМУТАЦИИ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ\*

**Ю.А. Казанский, Д.А.Клинов**

*Обнинский институт атомной энергетики, г.Обнинск*



В работе анализируется эффективность трансмутации опасных продуктов деления. Представлена математическая модель и результаты расчетов по этой модели. Показано, что в условиях работающей на постоянном уровне мощности ядерной энергетики, трансмутация опасных нуклидов не приведет к заметному выигрышу.

## ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Одна из существенных проблем ядерной энергетики связана с нахождением оптимального топливного цикла и надежного и безопасного способа обращения с отработавшим ядерным топливом. В конечном счете, ставится задача обеспечения минимизации выхода в окружающую среду радиоактивных отходов ядерной энергетики. Одно из направлений – это снижение активности радиоактивных отходов за счет трансмутации.

Идея трансмутации радиоактивных ядер в ядерных реакторах является очень простой по своему содержанию и привлекательной. Смысл трансмутации состоит в создании условий для эффективного взаимодействия нейтронов с радиоактивными ядрами, образовавшимися при работе реактора, с целью перевода их в менее опасные. Различным аспектам трансмутации посвящено множество работ и несколько конференций [1-3]; например, в [3] показано, что эта идея может быть реализована, поскольку в цепной реакции деления ядер оказывается достаточно «лишних» нейтронов. Одно из существенных условий процесса трансмутации – это требование, чтобы скорость протекания реакций поглощения нейтронов радиоактивными ядрами (произведение плотности потока нейтронов на микроскопическое сечение поглощения нейтронов трансмутируемых ядер) заметно превышала постоянную распада материнского ядра. В противном случае трансмутация не приведет к увеличению скорости исчезновения радиоактивных нуклидов. Скорость трансмутации определяется постоянной трансмутации,  $\lambda_{tr} = \Phi \sigma$ . Однако указанное требование не является достаточным, поскольку необходимо принимать во внимание и постоянную распада дочернего ядра.

В настоящей работе анализируется эффективность трансмутации продуктов деления. С этой целью вводится понятие «коэффициент трансмутации»  $\xi$ , определяемое как отношение радиоактивности при организации трансмутации к радиоактивности без трансмутации, зависящее от времени. Чем меньше  $\xi$ , тем больше эффективность трансмутации или, другими словами, тем меньше радиоактивность нук-

© Ю.А. Казанский, Д.А.Клинов, 2000

\* Работа поддержана грантом Минобразования РФ №18-89 Гр “Комплексный теоретический и расчетный анализ проблем РАО при различных сценариях развития ядерной энергетики”

лидов в сравнении со случаем радиоактивности без осуществления трансмутации.

## ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

При построении расчетной модели были приняты во внимание вполне очевидные обстоятельства.

Во-первых, в результате трансмутации могут образовываться и стабильные, и нестабильные дочерние ядра с постоянными распада  $\lambda_1$ , которые могут быть и больше, и меньше постоянной распада исходного (материнского) ядра,  $\lambda_0$ , поэтому коэффициент трансмутации зависит от соотношения постоянных распада материнского и дочернего ядер.

Во-вторых, отработавшее топливо находится в хранилищах и его радиоактивность для окружающей среды и человека имеет значение только в случае выхода радиоактивных нуклидов в окружающую среду, поэтому при наличии абсолютно надежных хранилищ (хотя бы на время, пока радиоактивный нуклид не распадется) трансмутация не имеет смысла. В связи с высказанными соображениями необходимо рассматривать радиоактивность не всех нуклидов, а только вышедших из хранилищ. Поэтому в рассматриваемой модели необходимо ввести вероятность выхода нуклидов в окружающую среду и, в конце концов, рассматривать коэффициент трансмутации относительно радиоактивности нуклидов в окружающей среде. В модели принято, что вероятность выхода нуклидов из хранилища в окружающую среду постоянна и ее значение есть  $\mu$ . Предположение о независимости  $\mu$  от времени не вполне верно. Более логично считать, что значение  $\mu$  будет возрастать со временем вследствие деградации хранилищ. При необходимости оценка зависимости  $\mu$  от времени может быть сделана при рассмотрении конкретного проекта хранилища.

При расчетах было выбрано  $\mu = \ln 2 / 3.1 \cdot 10^{11} [\text{с}^{-1}]$ , что соответствует вероятности разрушения половины хранилищ за  $10^4$  лет.

В-третьих, надо принять во внимание поступление радиоактивных нуклидов в хранилище из действующих реакторов. Достаточно очевидно, что при постоянной мощности ядерной энергетики, в конце концов, устанавливаются равновесные количества и материнского, и дочернего нуклидов (если дочерний нуклид не является стабильным), которые зависят от постоянных распада и трансмутации и от скорости наработки радиоактивных нуклидов. Скорость поступления нуклидов из реакторов в хранилище принята равной  $\alpha$  [яд./с].

В рассматриваемой модели предполагается, что трансмутация проводится непрерывно и начинается с выбранного момента времени. Последнее предположение повышает эффективность трансмутации, т.к. в реальной ситуации требуется время для химической переработки топлива, его выдержки, транспортировки и т.п., что приводит к уменьшению коэффициента трансмутации. Другими словами, оценки эффективности в рассматриваемых предположениях можно назвать наиболее оптимистическими с точки зрения целесообразности трансмутации.

## УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Запишем уравнения для количества материнских ядер, находящихся в хранилище,  ${}^{xp}N_0(t)$ , для количества материнских ядер, находящихся в окружающей среде,  ${}^{oc}N_0(t)$  и для полного количества материнских ядер,  $N_0(t)$ . Очевидно, что  $N_0(t) = {}^{xp}N_0(t) + {}^{oc}N_0(t)$ .

Ниже приведены соответствующие дифференциальные уравнения для случая, когда трансмутация не производится:

$$\frac{d {}^{xp}N_0}{dt} = \alpha - \lambda_0 {}^{xp}N_0 - \mu {}^{xp}N_0, \quad (1)$$

$$\frac{d^{oc}N_0}{dt} = -\lambda_0^{oc}N_0 + \mu^{xp}N_0, \quad (2)$$

$$\frac{dN_0}{dt} = -\lambda_0N_0 + \alpha. \quad (3)$$

Примем следующее начальное условие:

$$N_0(0) = {}^{xp}N_0(0) = {}^{oc}N_0(0) = 0. \quad (4)$$

Решения уравнений (1)-(3) очень просты; в качестве примера приведем лишь одно:

$${}^{oc}N_0(t) = \frac{\mu\alpha}{\lambda_0 + \mu} \left[ \frac{1}{\lambda_0} (1 - e^{-\lambda_0 t}) + \frac{1}{\mu} (e^{-(\lambda_0 + \mu)t} - e^{-\lambda_0 t}) \right]. \quad (5)$$

При  $t \rightarrow \infty$  устанавливаются асимптотические значения количества нуклида и в окружающей среде, и в хранилище. Верхний индекс «ас» в приведенных ниже выражениях указывает на значение данной функции при  $t$ , стремящемся к бесконечности:

$${}^{xp}N_0^{ac} = \frac{\alpha}{\lambda_0 + \mu}, \quad (6)$$

$${}^{oc}N_0^{ac} = \frac{\mu\alpha}{\lambda_0(\lambda_0 + \mu)}, \quad (7)$$

$$N_0^{ac} = \frac{\alpha}{\lambda_0}. \quad (8)$$

Отметим, что доля активности, вышедшей в окружающую среду, в асимптотике составляет

$$\frac{{}^{oc}A_0^{ac}}{A_0^{ac}} = \frac{\frac{\mu\alpha}{\lambda_0 + \mu}}{\alpha} = \frac{\mu}{\lambda_0 + \mu}. \quad (9)$$

В частности, это означает, что для очень долгоживущих ядер  $\lambda_0 \ll \mu$  все материнские ядра будут находиться в окружающей среде через время порядка нескольких  $1/\mu$ . Напротив, для ядер с короткими периодами распада  $\lambda_0 \gg \mu$  доля ядер, находящихся в окружающей среде, в асимптотике (через время порядка нескольких  $1/\lambda_0$ ) составит  $\mu/\lambda_0$ .

Запишем дифференциальные уравнения для процесса непрерывной трансмутации материнских ядер. Материнские ядра  $N_0$ , находящиеся под контролем, т.е. в реакторе или хранилище, подвергаются трансмутации. Понятие непрерывной трансмутации означает, что время нахождения в реакторе, где происходит трансмутация, намного больше, чем время на переработку топлива, его выдержку, транспортировку и т.п. В этом случае дифференциальные уравнения для материнских ядер имеют следующий вид:

$$\frac{d_{tr}N_0}{dt} = \alpha - \lambda_{0\ tr}N_0 - \lambda_{tr\ tr}^{xp}N_0, \quad (10)$$

$$\frac{d_{tr}^{xp}N_0}{dt} = \alpha - \lambda_{0\ tr}^{xp}N_0 - \mu_{tr}^{xp}N_0 - \lambda_{tr\ tr}^{xp}N_0, \quad (11)$$

$$\frac{d^{oc}N_0}{dt} = \mu^{xp}N_0 - \lambda_0^{oc}N_0, \quad (12)$$

где нижний индекс «tr» у функций  $N_0$  означает количества материнских ядер при условии непрерывной трансмутации. В случае непрерывной трансмутации индекс «xp» не вполне правилен, т.к. и материнские, и дочерние ядра никогда не бывают в хранилище. Их хранилищем является реактор. При вычислении коэффициента трансмутации предполагается, что выход радиоактивных нуклидов из реактора и хранилищ имеет одинаковую вероятность. Тогда вопрос о месте нахождения нуклидов (в реакторе или в хранилище) теряет смысл.

Начальные условия принимаем аналогичными (4), т.е. количество материнских ядер в нулевой момент времени равно нулю.

В тех случаях, когда дочерние ядра не являются стабильными, при вычислении коэффициента трансмутации необходимо учитывать их активность и, следовательно, их количество, решая соответствующие дифференциальные уравнения. Для дочерних ядер имеют место следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{dN_1}{dt} = \lambda_{tr}^{xp}N_0 - \lambda_1N_1, \quad (13)$$

$$\frac{d^{xp}N_1}{dt} = \lambda_{tr}^{xp}N_0 - \lambda_1^{xp}N_1 - \mu^{xp}N_1, \quad (14)$$

$$\frac{d^{oc}N_1}{dt} = \mu^{xp}N_1 - \lambda_1^{oc}N_1. \quad (15)$$

Уравнения (10)-(15) также имеют достаточно простые, но громоздкие аналитические решения. В качестве примера приведем решение для количества материнских и дочерних ядер в окружающей среде:

$$^{oc}N_0 = \frac{\mu\alpha}{\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu} \left[ \frac{1}{\lambda_0} (1 - e^{-\lambda_0 t}) + \frac{1}{\lambda_{tr} + \mu} (e^{-(\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu)t} - e^{-\lambda_0 t}) \right] \quad (16)$$

$$\begin{aligned} ^{oc}N_1 = & \frac{\mu\lambda_{tr}\alpha}{\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu} \left[ \frac{1}{\lambda_1 + \mu} \left( \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\mu} e^{-(\lambda_1 + \mu)t} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0 - \lambda_{tr}} \left( \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0 - \lambda_{tr} - \mu} e^{-(\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu)t} + \frac{1}{\mu} e^{-(\lambda_1 + \mu)t} \right) - \right. \\ & \left. - \left\{ \frac{1}{\lambda_1 + \mu} \left( \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\mu} \right) - \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0 - \lambda_{tr}} \left( \frac{1}{\lambda_1 - \lambda_0 - \lambda_{tr} - \mu} + \frac{1}{\mu} \right) \right\} e^{-\lambda_1 t} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Коэффициент трансмутации для радиоактивных ядер в окружающей среде вычисляется как

$$^{oc}\xi = \{\lambda_0^{oc}N_0 + \lambda_1^{oc}N_1\} / \lambda_0^{oc}N_0. \quad (18)$$

Представляет интерес коэффициент трансмутации для всех ядер (сумма ядер в окружающей среде и в хранилище), который вычисляется по следующей формуле:

$$\xi = \{\lambda_0^{tr}N_0 + \lambda_1N_1\} / \lambda_0N_0. \quad (19)$$

Асимптотические значения для количества ядер при проведении трансмутации имеют следующий вид при условии  $\lambda_1 \neq 0$ :

$${}^{xp}N_0^{ac} = \frac{\alpha}{\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu}, \quad (20)$$

$${}^{oc}N_0^{ac} = \frac{\mu \alpha}{\lambda_0 (\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu)}, \quad (21)$$

$${}^{tr}N_0^{ac} = \frac{(\lambda_0 + \mu) \alpha}{\lambda_0 (\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu)}, \quad (22)$$

$${}^{xp}N_1^{ac} = \frac{\lambda_{tr} \alpha}{(\lambda_1 + \mu)(\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu)}, \quad (23)$$

$${}^{oc}N_1^{ac} = \frac{\lambda_{tr} \mu \alpha}{\lambda_1 (\lambda_1 + \mu)(\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu)}, \quad (24)$$

$$N_1^{ac} = \frac{\lambda_{tr} \alpha}{\lambda_1 (\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu)}. \quad (25)$$

Приведенные асимптотические значения (20)-(25) позволяют вычислить асимптотические значения коэффициента трансмутации для радиоактивности в окружающей среде:

$${}^{oc}\xi_{ac} = \frac{{}^{oc}A_0^{ac} + {}^{oc}A_1^{ac}}{{}^{oc}A_0^{ac}} = \frac{(\lambda_1 + \mu + \lambda_{tr}) \cdot (\lambda_0 + \mu)}{(\lambda_1 + \mu) \cdot (\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu)} = \frac{1 + \lambda_{tr}/(\lambda_1 + \mu)}{1 + \lambda_{tr}/(\lambda_0 + \mu)}. \quad (26)$$

Из (26) следует, что  ${}^{oc}\xi_{ac} < 1$ , если  $\lambda_1 > \lambda_0$ , и  ${}^{oc}\xi_{ac} > 1$ , если  $\lambda_1 < \lambda_0$ . Превращение материнских ядер в результате трансмутации в более долгоживущие дочерние ядра в конце концов (в асимптотике) увеличивает радиоактивность в сравнении с радиоактивностью без трансмутации ядер, однако это асимптотическое значение достигается при  $\lambda_1 t > 5$ .

Необходимо отметить, что асимптотическое значение коэффициента трансмутации при условии  $\lambda_1 \neq 0$ , который записан для активности всех ядер (сумма активностей ядер в хранилище и в окружающей среде), оказывается равным единице:

$$\xi_{ac} = \frac{A_0^{ac} + A_1^{ac}}{A_0^{ac}} = \frac{(\lambda_0 + \mu) \cdot \alpha}{\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu} + \frac{\lambda_{tr} \cdot \alpha}{\lambda_0 + \lambda_{tr} + \mu} = 1. \quad (27)$$

Таким образом, трансмутация по прошествии длительного времени не оказывает влияния на суммарную ( ${}^{oc}A + {}^{xp}A$ ) активность продуктов деления. Другими словами, затрата сил, средств и времени на трансмутацию не приводит к изменению активности (в асимптотике).

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Для выяснения основных закономерностей проведены модельные расчеты с учетом того, что постоянная распада материнского ядра по порядку величин совпадает с постоянной трансмутации и намного больше вероятности отказа хранилища, при следующих предположениях о постоянной распада дочернего ядра:

- период полураспада дочернего ядра много меньше периода полураспада материнского ядра (в принятых в работе обозначениях это может быть записано как  $\lambda_1 \Phi \lambda_0 \approx \lambda_{tr} \Phi \mu$ );

- период полураспада дочернего ядра много больше периода полураспада материнского ядра (соответствующие соотношения в этом случае имеют вид  $\lambda_1 \gg \lambda_0 \approx \lambda_{tr}$  фф м);

- в результате трансмутации образуется стабильное ядро  $\lambda_1 = 0$ ,  $\lambda_0 \approx \lambda_{tr}$  фф м (для получения результатов при  $\lambda_1 = 0$  в уравнениях (13)-(15) надо всюду принять нулевой постоянную распада для дочерних ядер; в этом случае  $N_1(t)$  будет неограниченно возрастать во времени, а  $A_1(t) = 0$ ).

Результаты расчета коэффициента трансмутации для полной активности и коэффициента трансмутации для окружающей среды представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Номера у кривых соответствуют описанным выше предположениям о постоянной распада дочернего ядра. При расчетах были приняты следующие значения параметров ядер:  $\lambda_0 = \lambda_{tr} = 2.2 \cdot 10^{-10} \text{ c}^{-1}$  (соответствующий период полураспада равен 100 годам);  $\mu = 2.2 \cdot 10^{-12} \text{ c}^{-1}$  (соответствующий «период полураспада» хранилища  $10^4$  лет).

В первом случае  $\lambda_1 = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ , а во втором  $\lambda_1 = 2.2 \cdot 10^{-12} \text{ c}^{-1}$ .

Результаты расчета коэффициента трансмутации для окружающей среды показывают, что через 100 лет после начала трансмутации, в результате которой образуется короткоживущий нуклид, активность в окружающей среде уменьшится по сравнению с активностью в окружающей среде при отсутствии трансмутации на 20%. Через 1000 лет после начала трансмутации выигрыш составит всего около 2 раз.

При проведении такой трансмутации, когда в результате образуется значительно более долгоживущий нуклид, выигрыш в окружающей среде через 100 и 1000 лет составит 20 и 40% соответственно.

Отметим, что при трансмутации нуклида в более короткоживущий во временном интервале от 0 до примерно 10 лет активность в окружающей среде при проведении трансмутации больше активности в окружающей среде для случая, если бы трансмутация не проводилась. Этот факт объясняется тем, что активность в окружающей среде складывается из активностей ядер 0-го и 1-го сорта, а активность 1-го сорта ядер больше. Величина и промежуток времени, на котором наблюдается проигрыш при проведении трансмутации, зависят от значений  $\lambda_1$  и  $\lambda_{tr}$ .

Асимптотическое значение  $^{oc}\xi$  при рассмотренных выше условиях будет равно в первом случае 0.5 и 25.6 во втором случае, т.е. выигрыш и проигрыш соответственно.

Таблица 1

**Параметры долгоживущих радиоактивных нуклидов**

Нуклид	$T_{1/2}$ , годы	$^{trans}T_{1/2}$ , годы	$T_{1/2}$ дочернего ядра
$^{79}\text{Se}$	$6,5 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^2$	Стабильный
$^{90}\text{Sr}$	29	$2,2 \cdot 10^3$	9,5 ч
$^{93}\text{Zr}$	$1,5 \cdot 10^6$	$7,3 \cdot 10^2$	Стабильный
$^{94}\text{Nb}$	$2,0 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^2$	34 дня
$^{99}\text{Tc}$	$2,1 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^2$	15,8 с
$^{107}\text{Pd}$	$6,5 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^1$	Стабильный
$^{126}\text{Sn}$	$1,0 \cdot 10^5$	$4,4 \cdot 10^3$	2 ч
$^{129}\text{I}$	$1,6 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^2$	12 ч
$^{135}\text{Cs}$	$2,3 \cdot 10^6$	$3,1 \cdot 10^2$	13 дней
$^{137}\text{Cs}$	30	$2,2 \cdot 10^3$	32 мин
$^{151}\text{Sm}$	89	$3,1 \cdot 10^1$	Стабильный

Следует также отметить, что даже если в результате трансмутации образуется стабильное ядро, то при скоростях трансмутации порядка постоянной распада не удастся получить значительного выигрыша за разумное время.

Если же говорить не об активности в окружающей среде, а о полной активности, т.е. анализировать поведение  $\xi(t)$ , то, как уже отмечалось, асимптотические значения коэффициента трансмутации равны единице. Более того, при трансмутации материнского нуклида в короткоживущий нуклид на начальной стадии наблюдается проигрыш. Если же трансмутировать ядра в более долгоживущие, то будет наблюдаться выигрыш от таких действий на начальной стадии, но асимптотическое значение  $\xi$  будет равно единице.

В случае  $\lambda_1=0$  наблюдается снижение и  ${}^{oc}\xi$ , и  $\xi$ , и их асимптотические значения достигают 0.5.

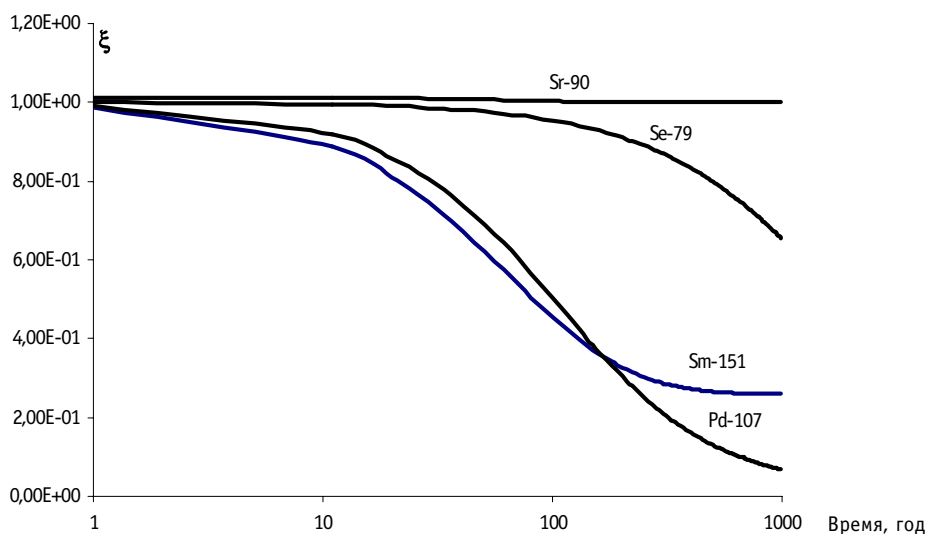


Рис. 1. Зависимость от времени коэффициента трансмутации для полной активности опасных нуклидов

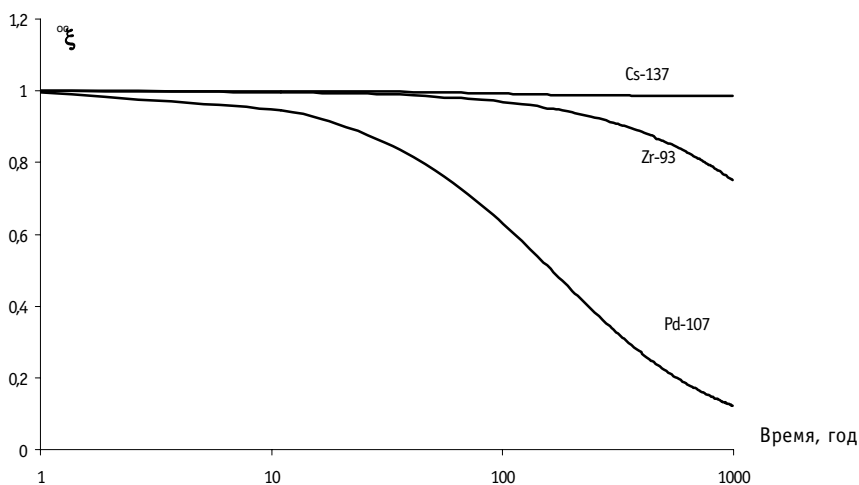


Рис. 2. Зависимость от времени коэффициента трансмутации для активности опасных нуклидов в окружающей среде

Таблица 2

**Коэффициенты трансмутации для полной активности и активности радионуклидов в окружающей среде**

		1 год	100 лет	1000 лет	Асимптотическое значение при $t \rightarrow \infty$
<sup>151</sup> Sm	$\xi$	0,99	0,45	0,26	0,26
	$^{oc}\xi$	0,99	0,56	0,26	0,26
<sup>107</sup> Pd	$\xi$	0,99	0,5	0,07	$4,4 \cdot 10^{-3}$
	$^{oc}\xi$	0,99	0,63	0,12	$4,4 \cdot 10^{-3}$
<sup>93</sup> Zr	$\xi$	1	0,95	0,66	$6,8 \cdot 10^{-2}$
	$^{oc}\xi$	1	0,97	0,75	$6,8 \cdot 10^{-2}$
<sup>137</sup> Cs	$\xi$	1,01	1	1	1
	$^{oc}\xi$	1	0,99	0,99	0,99
<sup>135</sup> Cs	$\xi$	7000	6620	2900	1
	$^{oc}\xi$	685	7	0,85	0,03
<sup>129</sup> I	$\xi$	$9,96 \cdot 10^4$	$8,07 \cdot 10^4$	$2,3 \cdot 10^4$	1
	$^{oc}\xi$	394	4	0,46	0,016
<sup>126</sup> Sn	$\xi$	23,7	23,5	21,3	1
	$^{oc}\xi$	1,02	0,99	0,95	0,33
<sup>99</sup> Tc	$\xi$	$1,9 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	302	1
	$^{oc}\xi$	1	0,82	0,27	0,01
<sup>94</sup> Nb	$\xi$	32,5	34,9	21	1
	$^{oc}\xi$	8,15	1,05	0,7	0,08
<sup>90</sup> Sr	$\xi$	1,01	1	1	1
	$^{oc}\xi$	1	0,99	0,99	0,99
<sup>79</sup> Se	$\xi$	1	0,95	0,65	0,08
	$^{oc}\xi$	1	0,97	0,75	0,08

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАНСМУТАЦИИ ДЛЯ ДОЛГОЖИВУЩИХ НУКЛИДОВ**

Приведенная математическая модель была использована для расчета  $\xi$  и  $^{oc}\xi$  для нуклидов, которые рассматривались в качестве “претендентов” на проведение их трансмутации. Набор таких нуклидов обычно определяется периодами полураспада ( $T_{1/2} > 30$  лет). В табл. 1 приведен набор нуклидов ([4]) с необходимыми данными для расчета коэффициентов трансмутации. При этом постоянная трансмутации определялась для спектра нейтронов быстрого реактора с плотностью потока нейтронов  $\Phi = 10^{15}$  н./( $\text{см}^2 \text{ с}$ ).

Результаты расчета  $\xi(t)$  - коэффициента трансмутации для полной активности для нескольких нуклидов из табл. 1 представлены на рис. 1. На рис. 2 приведен  $^{oc}\xi(t)$  - коэффициент трансмутации для тех же нуклидов в окружающей среде.

Численные значения  $\xi$  и  $^{oc}\xi$  в моменты времени 1 год, 100 и 1000 лет и их асимптотические значения для всех нуклидов из табл. 1 приведены в табл. 2.

Из представленных в табл. 2 результатов расчетов коэффициента трансмутации по активности опасных продуктов деления в окружающей среде следует, что через 100 лет после начала трансмутации реального выигрыша от ее использования нет. Из всех нуклидов выигрыш приблизительно в два раза наблюдается только для <sup>151</sup>Sm и <sup>107</sup>Pd. Такой выигрыш вряд ли можно считать существенным и проведение трансмутации целесообразной.

Отметим, что даже через тысячу лет будет достигнут выигрыш примерно на по-



рядок только для двух указанных выше продуктов деления.

Асимптотические значения коэффициента трансмутации показывают, что для таких нуклидов как  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , существенного выигрыша получить нельзя. Это, в первую очередь, связано с малой скоростью трансмутации этих нуклидов в реально существующих реакторах. Уменьшение их активности потребует создания специализированных установок, в которых скорость трансмутации должна быть заметно выше.

## Выводы

Полученные результаты оказываются весьма пессимистическими относительно эффективности трансмутации продуктов деления. Уточнение расчетной модели приведет к снижению эффективности трансмутации, по крайней мере, по двум причинам. Во-первых, необходимо принять во внимание время, необходимое на переработку материалов, изготовление топливных композиций, транспортировку, выдержку облученных материалов. Учет указанных обстоятельств равносителен снижению постоянной трансмутации, т.е. снижению эффективности трансмутации. Во-вторых, при рассмотрении конкретных нуклидов необходимо принимать во внимание и активность «внучатых» нуклидов, и накопление радионуклидов в конструкционных материалах топливных сборок. Вклад указанной радиоактивности может оказаться заметным в определенные отрезки времени.

## Литература.

1. Proc. Global 97, Yokohama, Oct. 5-10, 1997.
2. International Conference on the physics of reactors PHYSOR'96, Sept. 16-20, 1996, Mito, Ibraki, Japan.
3. The Frederic Joliot summer school in reactor physics. Cadarache, France, August 1998.
4. Salvatores M. The physics of transmutation for radioactive waste minimisation. // The Frederic Joliot summer school in reactor physics. Cadarache, France, August 1998.

Поступила в редакцию 18.09.2000

heating of fuel rod simulator, made on special heat-physical test facility is carried out. The results of modelling were used for examination of calculation technique of the heat-exchange in fuel rod subject to core and cladding melting.

#### **УДК 51-72:621.039.73**

*Efficiency of Fission Products Transmutation* \ Yu.A. Kazansky, D.A. Klinov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk, 2000.- 9 pages, 2 illustrations, 2 tables.-References, 4 titles.

The transmutation efficiency of dangerous fission products has been considered. Mathematical model and calculation results are presented. It is shown that there is not profit in radioactivity level on the Earth from transmutation if Nuclear Power under operating.

#### **УДК 51-72:539.172.12**

*Application of NRT-formula for Calculation of Displacement Cross-sections for Materials Irradiated by Nucleons of Intermediate and High Energy* \ A. Yu. Konobeyev, Yu. V. Konobeev, Yu. A. Korovin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk, 2000.- 6 pages, 5 illustrations.-References, 9 titles.

The behavior of cascade function for calculation of radiation damage in materials has been investigated at high energy of incident ions. The calculation of displacement cross-sections has been carried out for the number of materials with atomic number  $Z=13-28$ , irradiated by protons with the energy up to 25 GeV. It is shown that the displacement cross-section can be obtained within 5-20% error with the help of NRT-formula.

#### **УДК 51-72:621.039.516.4**

*Results of the Simulation of Parameters of the Fuel Cycle for the WWER-1000 Reactor with  $(m\%Th^{232}, n\%U^{235}, k\%Pu^{239})O_2$  Fuel Compositions* \ I. V. Shamanin, A. A. Ukhov, H.-J. Ruetten, K. Haas, W. Sherer; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk, 2000.- 12 pages, 4 illustrations, 12 tables.-References, 3 titles.

General parameters of the WWER Reactor using  $(m\%Th^{232}, n\%U^{235}, k\%Pu^{239})O_2$  fuel are analyzed. In all considered variations it was assumed that the construction of the active core and the fuel element assemblies are standard as for WWER-1000 reactor. Operation periods of 3, 4 and 5 burnup cycles were examined.

The aim of this study was to investigate the ability of the WWER-1000 as a potential nuclear power installation for the utilization of weapon grade plutonium in thorium-based fuel.

#### **УДК 621.311:621.039.004.7**

*Decommissioning of the First NPP* \ G. S. Kotikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk, 2000.- 5 pages, 1 tables.-References, 3 titles.

The materials about life cycle of the First NPP (Obninsk), with channel reactor are given in this paper. Now station exhaust the resource and in the near future its decommissioning will be made. On the basis of the decision of Government in the First NPP building should the Russian museum of atomic engineering organized.

#### **УДК 621.039.83:539.1:047**

*Short-lived Radionuclides in Experimental Nuclear Medicine and Biological Studies* \ G. A. Petrova, V. M. Petriev, V. G. Skvortsov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering)-Obninsk, 2000.- 6 pages, 3 illustrations, 2 tables.-References, 6 titles.