

# МАРКОВСКАЯ ЦЕПЬ С ДОХОДАМИ ДЛЯ ВЫБОРА НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫХ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ. ОБЩАЯ МОДЕЛЬ

**Ю.В. Волков, О.Б. Дугинов**

*Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск*



Разработана модель для описания межизотопных переходов на основе теории марковских цепей с доходами. Предложена итерационная процедура для определения наиболее значимых по заданному критерию маршрутов (стратегий) межизотопных переходов, приносящих наибольший эффект.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время к ядерным реакторам предъявляются более жесткие требования по безопасности и экологической приемлемости, чем на первых этапах развития атомной энергетики. Это вызывает необходимость проведения нейтронно-физических расчетов с более высокой точностью. Повысить точность вычислений, сократить их объем и время, затрачиваемое на предварительную подготовку данных, можно путем более полного учета межизотопных переходов для дочерних продуктов делений тяжелых ядер в ядерных реакторах. Часто отсутствует необходимость в учете всех подряд переходов, да это и невозможно, т.к. для многих изотопов данные о некоторых переходах просто отсутствуют. В этом случае возникает задача отбора по какому-либо критерию наиболее значимых переходов или изотопов. Например, при проведении проектных расчетов выгорания топлива можно отбирать изотопы, вносящие наибольший вклад в нейтронный баланс. При этом необходимо учитывать, что некоторые изотопы могут не влиять непосредственно на критериальную величину, однако это влияние может быть значительным через их дочерние, внучатые и т.д. изотопы.

При достаточных опыте и навыках отбор значимых изотопов может быть сделан человеком-специалистом, но никогда нельзя дать стопроцентной гарантии, что он не допустит ошибку. Такая гарантия может быть обеспечена, если отбор значимых изотопов автоматизирован. Автоматизация отбора наиболее значимых по заданному критерию изотопов может быть осуществлена с помощью модели марковской цепи с доходами [1, 2]. Далее в статье показано, как можно решить такую задачу.

## ТЕОРИЯ

### Описание межизотопных переходов

Цепочку превращений для каждого изотопа с номером  $i$  и массой  $j$  в основном ( $m=0$ ) или метастабильном ( $m=1$ ) состоянии можно представить схемами переходов, изображенными на рисунке. На этих схемах направления стрелок указывают направ-

ления только тех переходов, которые возможны. Отсутствие стрелок указывает на невозможность сообщения состояний. Понятно, что массив  $(I, J, M)$  ( $J$  – максимальная известная масса изотопов;  $I$  – максимальный, известный сейчас заряд ядра, т.е. номер элемента;  $M=2$ ) заполнен лентой стабильности, а все остальные элементы массива пусты.

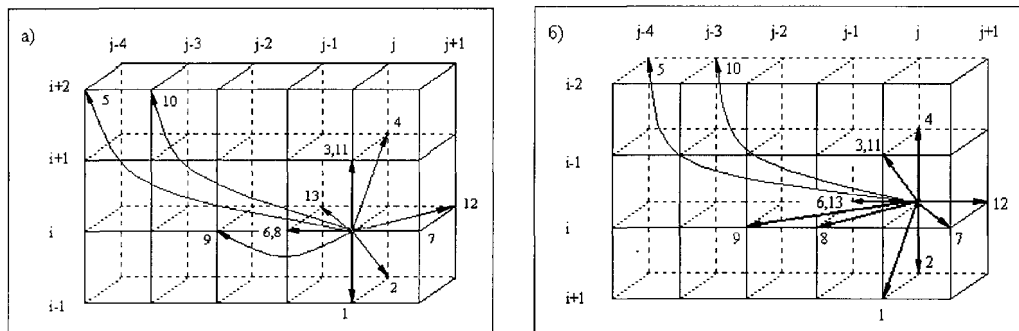


Схема в принципе возможных переходов из изотопа с номером  $(i, j)$  в другие: а) из основного состояния; б) из метастабильного состояния

Перенумеруем все подряд изотопы следующим образом: элементы массива  $(I, J, M)$  нумеруем по слоям в глубину, т.е. сначала нумеруем нуклид в основном состоянии, а потом этот же нуклид в метастабильном состоянии. Таким образом, первая строка заканчивается номером  $2J$ . Во второй строчке первый изотоп имеет номер  $2J+1$  и т.д.

Каждый изотоп может перейти в другой нуклид за счет следующих процессов:

- 1)  $\beta^-$ -распад в основное состояние;
- 2)  $\beta^-$ -распад в метастабильное состояние;
- 3)  $\beta^+$ -распад в основное состояние;
- 4)  $\beta^+$ -распад в метастабильное состояние;
- 5)  $\alpha$ -распад;
- 6)  $n$ -распад;
- 7) реакция  $(n, \gamma)$  с переходом в основное состояние;
- 8) реакция  $(n, 2n)$  с переходом в основное состояние;
- 9) реакция  $(n, 3n)$  с переходом в основное состояние;
- 10) реакция  $(n, \alpha)$  с переходом в основное состояние;
- 11) реакция  $(n, p)$  с переходом в основное состояние;
- 12) реакция  $(n, \gamma)$  с переходом в метастабильное состояние;
- 13) реакция  $(n, 2n)$  с переходом в метастабильное состояние;
- 14) "остаться в самом себе".

Таким образом, связь между номером  $k$  изотопа в новой линейной нумерации и нумерацией массива  $(i, j, m)$  такая:

$$K=2J(i-1)+2j-N,$$

где  $N=1$ , если нуклид в основном состоянии;  $N=0$ , если нуклид в метастабильном состоянии.

Тогда скорости реакций, относящихся к  $k$ -му изотопу, можно в общем виде записать следующим образом:

для четных  $k$  (нуклид в основном состоянии)

$$\begin{aligned} a_{k,k+2J} &= \lambda_{\beta^-}^k; & a_{k,k-4J-8} &= \lambda_{\alpha}^k; & a_{k,k+2J+1} &= \lambda_{\beta_m^-}^k; \\ a_{k,k+2} &= \sigma_{(n,\gamma)}^k \cdot \bar{\Phi}; & a_{k,k-2J+1} &= \lambda_{\beta_m^+}^k; & a_{k,k-4J-6} &= \sigma_{(n,\alpha)}^k \cdot \bar{\Phi}; \end{aligned}$$

$$a_{k,k+3} = \sigma_{(n,\gamma)_m}^k \cdot \bar{\Phi}; \quad a_{k,k-1} = \sigma_{(n,2n)_m}^k \cdot \bar{\Phi};$$

$$a_{k,k-2J} = \lambda_{\beta^+}^k + \sigma_{(n,p)}^k \cdot \bar{\Phi}; \quad a_{k,k-2} = \lambda_n^k + \sigma_{(n,2n)}^k \cdot \bar{\Phi} + \sigma_{(n,3n)}^k \cdot \bar{\Phi},$$

где  $a$  – скорость реакции,  $1/\text{см}^3 \text{ с}$ ;  $\sigma$  – сечение реакции, барн;  $\bar{\Phi}$  – поток нейтронов,  $1/\text{см}^2 \text{ с}$ ;  $\lambda$  – постоянная распада,  $1/\text{с}$ ;  $m$  – реакция с переходом нуклида в метастабильное состояние.

Для нечетных  $k$  (нуклид в метастабильном состоянии) выражения для интенсивностей переходов строятся исходя из аналогичных рассуждений.

Понятно, что какие-то переходы не учтены, некоторые из записанных переходов не возможны (или не имеют данных) для конкретного изотопа. В таком случае соответствующие скорости реакций полагаются равными нулю.

Остальные скорости реакций, которые могли бы относиться к  $k$ -му изотопу, равны нулю.

Скорости реакций  $a_{k,n}$  составляют квадратную матрицу  $A$  размерности  $MIJ \times IJM$ .

### Марковская цепь с непрерывным временем как модель межизотопных переходов

Если принять, что матрица  $A$  есть матрица интенсивностей перехода между состояниями марковской цепи с непрерывным временем, мы приходим к марковской модели межизотопных переходов, управляемых матрицей  $A$ . Для матрицы вероятностей переходов  $P(t) = \{P_{k,n}(t)\}$ , где  $P_{k,n}(t)$  – вероятность перехода из состояния  $k$  в состояние  $n$  в момент времени  $t$ , справедлива система уравнений

$$\frac{dP}{dt} = PA$$

с начальным условием

$$P(0) = 1.$$

Стационарные вероятности состояний  $\bar{\pi} = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{IJ}\}$  введенной марковской цепи подчиняются системе линейных алгебраических уравнений

$$\bar{\pi}A = 0$$

с дополнительным условием

$$\sum_{k=1}^N \pi_k = 1.$$

Стационарные вероятности  $\pi_k$  можно интерпретировать как доли ядер соответствующих изотопов в общей массе всех  $N$  изотопов в реакторе, вышедшем на стационарный режим перегрузок.

Интенсивность  $a_{kk}$  изотопу  $k$  остаться в системе определяется как

$$a_{kk} = - \sum_{n \neq k} a_{kn}.$$

### Доходы от межизотопных переходов

В зависимости от того, какой эффект интересует, можно вводить различные системы доходов от межизотопных переходов. Например, если межизотопные переходы интересуют как поставщики радиоактивных излучений, то матрица доходов  $R$  будет иметь такую структуру:

$r_{kk} = 0$ , если не снимается возбуждение выделением  $\gamma$ -кванта;  $r_{kk} \neq 0$ , если выделяется  $\gamma$ -квант;  $r_{kj} \neq 0$  для всех  $j$ , переходы в которые из  $k$  возможны и в результате ко-

торых образуются  $\alpha$ -,  $\beta$ -частицы или нейтроны.

Если интересует влияние межизотопных переходов на нейтронный баланс, то структуру матрицы  $R$  можно задать, например, в следующем виде:

- для  $\beta^-$ -,  $\beta^+$ -,  $\alpha$ -распадов и возможности "остаться в самом себе" доход  $r = 0$ ;
- для реакций  $(n, \gamma)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$  и  $n$ -распада –  $r = 1$ ;
- для реакций  $(n, 2n)$  и  $(n, 3n)$  –  $r = 3$  и  $r = 4$  соответственно.

Понятно, что изотопы могут приносить эффект (доход) или непосредственно в результате их радиоактивных превращений, или опосредованно через дочерние, внучатые и т.д. изотопы. В дальнейшем нас будет интересовать полный ожидаемый эффект (доходом) от всей совокупности возможных ядерных превращений продуктов деления. Чтобы найти наилучший маршрут переходов между изотопами, максимизирующий полный ожидаемый доход, непосредственным перебором возможных переходов необходимо рассмотреть  $N^D$  вариантов, где  $N$  – число изотопов включая продукты деления и продукты из распада, а также актиниды,  $D=14$  – число всех возможных переходов для одного изотопа. Поскольку в данной модели  $N \approx 50000$ , то ясно, что непосредственным перебором вариантов задачу поиска наиболее значимых (приносящих наибольший полный ожидаемый доход) продуктов деления решить за разумное время невозможно. В работе [1] предложен ряд процедур, которые можно использовать для поиска за конечное (разумное) число шагов маршрута межизотопных переходов, приносящего максимальный эффект (доход).

Следуя работе [1], введем  $v_k(t)$  – полный ожидаемый эффект (доход) от системы изотопов, если начать переходы с  $k$ -го изотопа. Непосредственно ожидаемый эффект (доход) в единицу времени от  $k$ -го изотопа есть

$$q_k = r_{kk} + \sum_{n \neq k} a_{kn} r_{kn}.$$

Для вектора доходов  $\vec{v}(t) = \{v_1, v_2, \dots, v_{14}\}$  справедливо уравнение

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = A\vec{v} + \vec{q}, \quad (1)$$

которое необходимо дополнить начальным условием  $\vec{v}(0)$ . Как показано в работе [1], уравнение (1) имеет асимптотическое решение вида

$$\vec{v}(t) = t\vec{g} + \vec{c},$$

где  $\vec{g}$  – вектор прибылей (скоростей  $g_k$  роста эффекта в состоянии  $k$ );  $\vec{c}$  – вектор постоянных, определяемый, главным образом, начальным условием  $\vec{v}(0)$ .

## АЛГОРИТМЫ ОТБОРА ЗНАЧИМЫХ ИЗОТОПОВ

Введем понятие стратегии (решения) в состоянии  $k$ . Для каждого  $k$ -го изотопа мы можем начать перебор вариантов перехода в другие изотопы, располагая 14-ю путями. Решение начать перебор вариантов из состояния  $k$  с перехода под номером  $d_k$  мы будем называть стратегией  $d_k$ . Поскольку мы рассматриваем здесь стационарное состояние совокупности изотопов, то можем считать, что процесс ядерных превращений длится очень долго. Для отыскания оптимального решения в процессах большой длительности с непрерывным временем был разработан *итерационный* метод [1, 2]. Каждая итерация состоит из двух частей – определения весов и улучшения решения.

**Определение весов.** Для данного решения полный ожидаемый доход системы в момент времени  $t$ , если переходы в ней начались из состояния  $i$ , есть  $v_i(t)$ .

Поскольку здесь рассматриваются только процессы большой продолжительности, то для каждого  $v_i(t)$  можно при больших  $t$  использовать асимптотическое выраже-

ние:

$$v_i(t) = t \cdot g_i + c_i, \quad (2)$$

где  $g_i$  – прибыль системы,  $c_i$  – относительный вес.

Используя (2), преобразуем (1) в систему алгебраических уравнений

$$g_i = q_i + t \cdot \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot g_j + \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot c_j, \quad i=1,2,\dots, N. \quad (3)$$

Поскольку уравнение (3) должно быть справедливо при всех достаточно больших  $t$ , то, выделяя слагаемое с множителем  $t$ , получаем две системы линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot g_j = 0, \quad i=1,2,\dots, N \quad (4)$$

и

$$g_i = q_i + \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot c_j, \quad i=1,2,\dots, N. \quad (5)$$

При помощи уравнений (4) прибыль в каждом состоянии выражается через прибыли эргодических классов процесса. Полагая относительный вес одного из состояний в каждом эргодическом классе равным нулю, например,  $c_N = 0$ , из уравнений (5) находим оставшиеся веса и прибыли эргодических классов.

На практике решение уравнений (4) и (5) может оказаться затруднительным или вовсе невозможным из-за больших размеров системы уравнений (получаемая матрица переходов  $A$  имеет размерность  $\approx 50000 \times 50000$ ). Облегчить задачу можно, если исключить из рассмотрения те нуклиды, данные по которым отсутствуют. В предварительных исследованиях по подготовке константного обеспечения [4] было выяснено, что в различных библиотеках ядерных данных содержится информация примерно о 1000 различных нуклидов. Объединим все нуклиды, на которых обрываются цепочки ядерных превращений в один “эффективный” стабильный нуклид.

Проведем новую нумерацию нуклидов в порядке возрастания индентификатора изотопа в виде

$$I = 10000 \cdot Z + 10 \cdot A + m,$$

где  $Z$  – атомный номер нуклида;  $A$  – атомная масса нуклида;  $m=0$ , если нуклид в основном состоянии,  $m=1$ , если нуклид в метастабильном состоянии.

“Эффективный” нуклид поместим в конец списка.

Таким образом, полученная новая матрица интенсивностей перехода будет иметь размерность  $\approx 1300 \times 1300$ .

Задача нахождения эргодических классов системы и состояний, соответствующих каждому классу, в общем виде описана в [3]. В нашем случае процедура поиска эргодических классов очень проста, т.к. каждая стратегия включает в себя только один переход, удовлетворяющий условию:

$$\alpha_{k,n} = -\alpha_{k,k}.$$

**Улучшение решения.** Предположим, что известно поведение, которое будет оптимальным, если до окончания процесса осталось  $t$  единиц времени, и что  $v_i(t)$  ( $i=1,2,\dots, N$ ) являются полными ожидаемыми доходами при этом поведении. Рассмотрим вопрос о том, какого поведения нужно придерживаться, если в нашем распоряжении имеется более чем  $t$  единиц времени; из уравнения (1) видно, что скорость роста величины  $v_i(t)$  будет наибольшей, если максимизировать выражение

$$q_i^k + \sum_{j=1}^N a_{ij}^k \cdot v_j(t)$$

относительно стратегий  $k$  в состоянии  $i$ . Если  $t$  велико, то используя равенство (2) можно получить критерий максимизации в  $i$ -том состоянии в виде

$$q_i^k + \sum_{j=1}^N a_{ij}^k \cdot (t \cdot g_j + c_j). \quad (6)$$

При больших  $t$  выражение (6) достигает максимума на стратегии, которая максимизирует основной критерий

$$\sum_{j=1}^N a_{ij}^k \cdot g_j, \quad (7)$$

используя прибыль старого решения. Однако, если все стратегии приводят к одному и тому же значению выражения (7) или если часть стратегий приводит к одному и тому же его максимальному значению, то среди этих стратегий нужно выбрать ту, которая максимизирует дополнительный критерий

$$q_i^k + \sum_{j=1}^N a_{ij}^k \cdot c_j, \quad (8)$$

используя относительные веса старого решения.

### Алгоритм отбора значимых изотопов

Процедура отбора значимых продуктов деления может быть организована следующим образом. Для каждого изотопа с номером  $i$  и для каждого решения  $k$  по уравнениям (4), (5) находим относительные веса  $c_i$  и прибыли  $g_i$ . При этом, поскольку в общем случае трудно сразу для всех изотопов выбрать специальное начальное решение, началом итерационной процедуры может быть этап улучшения решения в предположении для всех  $i$ , что  $c_i=0$ . В этом случае, как это видно из (8), максимизируется непосредственно ожидаемый эффект (доход).

Далее решается задача определения весов по уравнениям (4), (5) при выбранном решении  $d_k$ . С применением полученных весов, переходим к этапу улучшения решения и т.д.; в конце концов, процедура сойдется за конечное число итераций к какому-то вектору решений  $\vec{d} = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$ . Вектор наилучших решений даст вектор максимальных полных доходов, которые принесет система, отправившись из состояния  $i$  –  $\vec{v}(1) = \{v_1(1), v_2(1), \dots, v_N(1)\}$ , где компонентами являются суммы  $v_i(1) = g_i + c_i$  прибылей и весов.

Остается только расставить эти компоненты по величине и отобрать те изотопы, которые обладают максимальными значениями  $v_i(1)$ . Сделать это можно используя разности значений относительных весов.

Имеются также другие методы определения стратегий, приносящих максимальный доход. Это *рекуррентный* метод и метод *последовательных решений с переоценкой* [1]. Однако рекуррентный метод может применяться только для процессов малой длительности, а процессы с переоценкой применять в этой задаче бессмысленно.

### ПРИМЕР

Найдем оптимальное решение для системы с четырьмя состояниями, вероятности переходов и доходы которой показаны в табл. 1. Одно из состояний является поглощающим. Ради упрощения вычислений рассмотрим систему с одним эргодическим классом.

Таблица 1

**Пример процесса с одним эргодическим классом и поглощающим состоянием**

Состояние i	Стратегия k	Интенсивности переходов				Непосредственно ожидаемый доход $q_i^k$
		$a_{i1}^k$	$a_{i2}^k$	$a_{i3}^k$	$a_{i4}^k$	
1	1	-5	5	0	0	5
	2	-2	0	2	0	3
2	1	0	-1	0	1	0.02
	2	0	-0.03	0.03	0	0.09
3	1	0	0	-1.7	1.7	1.7
	2	0	0	-0.5	0.5	0.1
4	1	0	0	0	0	0

Начнем с решения, которое максимизирует непосредственно ожидаемый доход. Это решение составляется из первой стратегии в 1,3 и 4 состояниях и второй во - 2 состоянии.

$$d = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} 5 \\ 0.09 \\ 1.7 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Перейдем к оценке решения. Уравнения (4) принимают вид

$$g_1=g_2, g_2=g_3, g_3=g_4.$$

Они показывают, что существует только один эргодический класс, включающий в себя все четыре состояния. Если использовать эти результаты при написании уравнений (5), положив, например, относительный вес  $c_4=0$ , то получаются следующие соотношения:

$$g=5+5c_2-5c_1, g=0.09+0.03c_3-0.03c_2, g=1.7-1.7c_3, g=0.$$

Их решением является  $g=0, c_1=5, c_2=4, c_3=1, c_4=0$ .

Теперь можно искать лучшие решения. В [1] показано, что улучшение решения для эргодической системы надо проводить по дополнительному критерию. Новым решением является

$$d = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Новое решение эквивалентно старому, следовательно оно оптимальное. Данное решение обеспечит прибыль в 0 единиц в каждый момент времени. Этот результат также следует из наличия в системе поглощающего состояния – при  $t \rightarrow \infty$  система с вероятностью 1 окажется в этом состоянии и уже никогда его не покинет и прибыль в единицу времени будет ограничена непосредственно ожидаемым доходом поглощающего состояния [1]. Теперь выстроим состояния по величине полного дохода в порядке убывания. Найдем разницы весов

$$c_1-c_2= 1, c_1-c_3=4, c_1-c_4=5, c_2-c_3= 3, c_2-c_4=4, c_3-c_4=1,$$

тогда полные доходы состояний будут удовлетворять следующему соотношению:

$$V_1 > V_2 > V_3 > V_4.$$

Положив  $v_4=0$ , получим  $v_1=5$ ,  $v_2=4$ ,  $v_3=1$ . В итоге получаем, что если система выйдет из состояний 1, 2, 3, 4, то она принесет 5, 4, 1 и 0 единиц дохода соответственно. Следовательно, в этом примере состояния можно выстроить по ранжиру следующим образом: максимальный эффект будет получен от первого состояния, далее следуют второе, третье и четвертое.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Разработана марковская модель с доходами для описания межизотопных переходов и реализован алгоритм выбора оптимальной стратегии отбора значимых по какому-либо критерию продуктов деления за конечное число шагов.

Проведены предварительные исследования по константному обеспечению разработанной модели.

## **Литература**

1. Ховард Р. Динамическое программирование и марковские процессы. – М: Сов. радио, 1964.
2. Майн Х., Осаки С. Марковские процессы принятия решений. – М: Наука, 1977.
3. Романовский В. И. Дискретные цепи Маркова. – М.: Гостехиздат, 1959.
4. Волков Ю.В., Дугинов О.Б., Клинов Д.А., Колесов В.В. Отчет о НИР «Разработка и верификация марковской модели эффективного осколка деления» Марковская модель эффективного осколка деления (заключительный). № ГР 01200013135, Инв. № 02200100388.

Поступила в редакцию 15.02.2002



assessment practice, but may be employed in research projects. A comparison of chemical and radioactivity data with generic guideline values or quality criteria derived from toxicity data. Bioassays with material from the contaminated site as a supplement to chemical and radioactivity analysis.

#### **УДК 621.039.586:536.42**

*Numerical Modelling of Pin Meltdown in View of Molten Cladding Relocation in BN Reactor Core under beyond Design Accident* \ G.N. Vlasichev, G.B. Usinin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 9 pages, 5 illustrations. - References, 9 titles.

The technique of account of emergency process of pin heating and melting is developed in view of molten cladding relocation at the termination of coolant flow in fuel assembly of the fast reactor with sodium coolant. The calculation analysis of meltdown process of separate most heat-stressed pin of central assembly in BN reactor core is executed in view of molten cladding relocation under beyond design accident with loss of power providing without operation of all means of effect on reactivity. In model of the given work evaporation of sodium in addition is taken into account. In result, the melting times of pin cladding and fuel are received in view of molten cladding relocation, freezing of its material on more cold pin sites and frozen crust melting. The fuel melting sequence on core height received as a result of previous cladding relocation to the bottom part of core, will result in occurrence and preservation during any of time of a configuration of pin materials in most heat-stressed assemblies, bringing in the greatest contribution in reactivity.

#### **УДК 621.039.5**

*Markov Chain with Rewards for Selection Most Significant Fission Products. General model* \ Yu. V. Volkov, O. B. Duginov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 8 pages, 1 illustration, 1 table. - References, 4 titles.

The Markov model with rewards for description of isotope transitions is developed. The iterative method for determination the most significant route (strategies) of isotope transitions according to given criterion which bring the largest effect has been proposed.

#### **УДК 621.039.7**

*Norms of Criticality Safety at Handling with Wastes, Containing Plutonium and Uranium of Low Enrichment* \ S.S. Krechetov, V.S. Vnukov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2002. – 5 pages, 7 tables. – References, 3 titles

Norms of criticality safety are determined at handling with the wastes containing plutonium and uranium of low enrichment. Calculations of the safe specific contents, the safe areal density are carried out at the analysis of nuclear safety of radioactive wastes. Various mixes of the radioactive wastes containing water, graphite, beryllium, dioxide silicon and others are considered. Recommended norms of criticality safety are given at handling with wastes.

#### **УДК 621.039.7:66.081.3**

*Experimental Investigation of Possibility of Concentrated Liquid Radwaste Disposal of  $^{137}\text{Cs}$  by Sorption Method with Following Immobilization of Sorbents into Geocement Rock* \ T.O. Mishevets, N.G. Bogdanovich, O.V. Starkov, E.E. Konovalov, D.L. Tyutyunnikov, V.P. Emelyanov, V.V. Molchanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering). - Obninsk, 2002. - 5 pages, 1 table. - References, 8 titles.

The preliminary examinations on a technological regime of the discharge by inorganic sorbents from  $^{137}\text{Cs}$  of model and actual solutions IPPE concentrated liquid radioactive wastes (CLRW) are held. Three are explored such as sorbents: natural silica-alumina sorbent clinoptilolite, modified ions of sodium (KLN-Na) or copper and ferri ferrocyanides (KLN-FC); synthetic ferrocyanide sorbents Thermoxide-35 and NGS.

In experiments with usage of model solutions CLRW the prospects of applying for discharging concentrated liquid radioactive wastes by synthetic ferrocyanide Thermoxide-35 and NGS is affirmed. The applying KLN for getter extraction of cesium is possible at the containment of salts