

ТРАНСМУТАЦИЯ ОСКОЛОЧНОГО ПАЛЛАДИЯ В БЛАНКЕТЕ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ С РЕЗОНАНСНЫМ СПЕКТРОМ НЕЙТРОНОВ

А.Е. Синцов*, В.А. Апсэ*, А.Н. Шмелев*, М. Саито, В.В. Артисюк****

** Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет), г. Москва*

*** Токийский институт технологии, Япония*



Рассматривается трансмутация радиоактивного продукта деления - палладия без предварительного изотопного разделения. Трансмутацию осколочного палладия предполагается осуществлять в бланкете специализированной термоядерной установки путем облучения в резонансном спектре нейтронов смеси изотопов палладия и превращения их в стабильные изотопы серебра и кадмия. Трансмутация рассматривается в трех вариантах термоядерной установки: с равнокомпонентной dt -плазмой; с плазмой, содержащей уменьшенное количество трития (с ddt -плазмой), и с dd -плазмой, т.е. анализируется эффективность трансмутации при переходе от dt -плазмы к dd -плазме.

ВВЕДЕНИЕ

Трансмутация осколочного палладия без изотопного разделения требует достаточно большого количества нейтронов. Как известно [1, 2], быстрый реактор рассматривается как источник избыточных нейтронов для трансмутации долгоживущих радионуклидов - продуктов деления с предварительным изотопным разделением; некоторые из радионуклидов могут быть трансмутированы со средним временем жизни в нейтронном поле менее 50 лет (^{99}Tc , ^{129}I , ^{107}Pd). Если же рассматривать трансмутацию долгоживущих продуктов деления без предварительного изотопного разделения, то избыточных нейтронов быстрого реактора для этого уже будет недостаточно. Поэтому в данной работе рассматривается трансмутация осколочного палладия без предварительного изотопного выделения долгоживущего ^{107}Pd в бланкете специализированной термоядерной установки типа ITER. Как было показано ранее [3], технология термоядерного синтеза характеризуется богатой генерацией избыточных нейтронов (в расчете на единицу энергии), что позволяет использовать ее для обезвреживания долгоживущих продуктов деления в крупномасштабной ядерной энергетике, основанной на процессе деления.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСКОЛОЧНОГО ПАЛЛАДИЯ

В топливе уранового легководного реактора (LWR) электрической мощностью 1 ГВт ежегодно накапливается около 30 кг осколочного палладия, в состав кото-

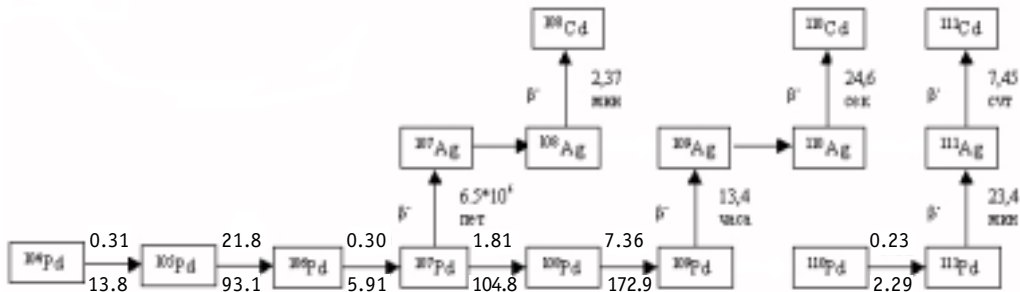


Рис.1. Схема значимых переходов при трансмутации элементного палладия

рого входят шесть изотопов, из них пять стабильных и один долгоживущий ^{107}Pd ($T_{1/2}=6,5\cdot 10^6$ лет).

На рис.1 изображена схема изотопных переходов, учитываемых в расчетах трансмутации осколочного палладия. Видно, что долгоживущему изотопу ^{107}Pd предшествуют три стабильных изотопа ^{104}Pd , ^{105}Pd , ^{106}Pd , связанные между собой (n,γ)-реакциями. Горизонтальные стрелки на рис. 1 означают изотопные переходы, обусловленные (n,γ)-реакциями, а вертикальные - β-распадами. Над и под горизонтальными стрелками указаны микропоглощения захвата для тепловой точки (в барнах) и усредненные одгрупповые сечения, соответствующие условиям трансмутации в бланкете термоядерной установки.

В табл.1 приводятся выходы изотопов осколочного палладия: Y_{fis} - кумулятивный выход в расчете на одно деление ^{235}U [4], Y - реальный выход в расчете на одно деление в урановом легководном реакторе с учетом выгорания и 150-суточной выдержки в составе облученного топлива [5]. Видно, что кумулятивный и реальный выходы палладия существенно различаются. Это, в частности, связано с тем, что выход палладия при делении плутония (который накапливается и горит в урановом LWR) существенно больше, чем при делении урана [4] и поэтому в дальнейших расчетах использовались данные только о реальном выходе. Минимальный расход нейтронов для трансмутации палладия, образующегося в урановом LWR, в расчете на одно деление составляет ~ 0.19 нейтрона (табл.1). В соответствии с цепочкой изотопных переходов, приведенной на рис.1, минимальный расход нейтронов для превращения осколочного палладия в изотопы серебра и кадмия оценивался по следующей формуле:

$$N_{\text{min}}=5\cdot Y(^{104}\text{Pd}) + 4\cdot Y(^{105}\text{Pd}) + 3\cdot Y(^{106}\text{Pd}) + 2\cdot Y(^{107}\text{Pd}) + 1\cdot Y(^{108}\text{Pd}) + 1\cdot Y(^{110}\text{Pd}).$$

Таблица 1

Исходные данные для нейтронно-физических расчетов

Изотоп	Y_{fis} , %	Y , %	Минимальный расход нейтронов в расчете на одно деление
^{104}Pd	0	0,943	0,047
^{105}Pd	0,958	1,67	0,067
^{106}Pd	0,407	1,42	0,043
^{107}Pd	0,139	1,16	0,023
^{108}Pd	0,057	0,735	0,0074
^{110}Pd	0,025	0,156	0,0016
Сумма	1,586	6,08	0,189

Скорость трансмутации элементного палладия зависит от величин нейтронных сечений как долгоживущего нуклида ^{107}Pd , так и его предшественников в цепочке. На рис.2 приведены энергетические зависимости микросечений захвата для двух изотопов-предшественников ^{105}Pd , ^{106}Pd и основного трансмутируемого изотопа ^{107}Pd . Видно, что большими значениями сечений характеризуется область резонансных энергий. Это и определило целесообразность формирования резонансного спектра нейтронов в зоне трансмутации.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСМУТАЦИОННОЙ ТЕРМОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ

Для проведения нейтронно-физических расчетов была использована одномерная цилиндрическая модель трансмутационной термоядерной установки (ТТЯУ), состоящей из двух частей - плазменной и бланкетной. Плазменная часть ТТЯУ служит для генерации нейтронов, бланкетная - для трансмутации осколочного палладия и воспроизводства трития, который затем может использоваться в плазме. На рис. 3 показаны структура, размеры и состав зон ТТЯУ. Размеры плазменной части ТТЯУ соответствуют размерам плазменной части ITER, которая включает в себя область плазмы (распределенный источник нейтронов) и вакуумный зазор между плазмой и первой стенкой.

Предполагается, что ТТЯУ работает в условиях самообеспечения тритием, т.е.

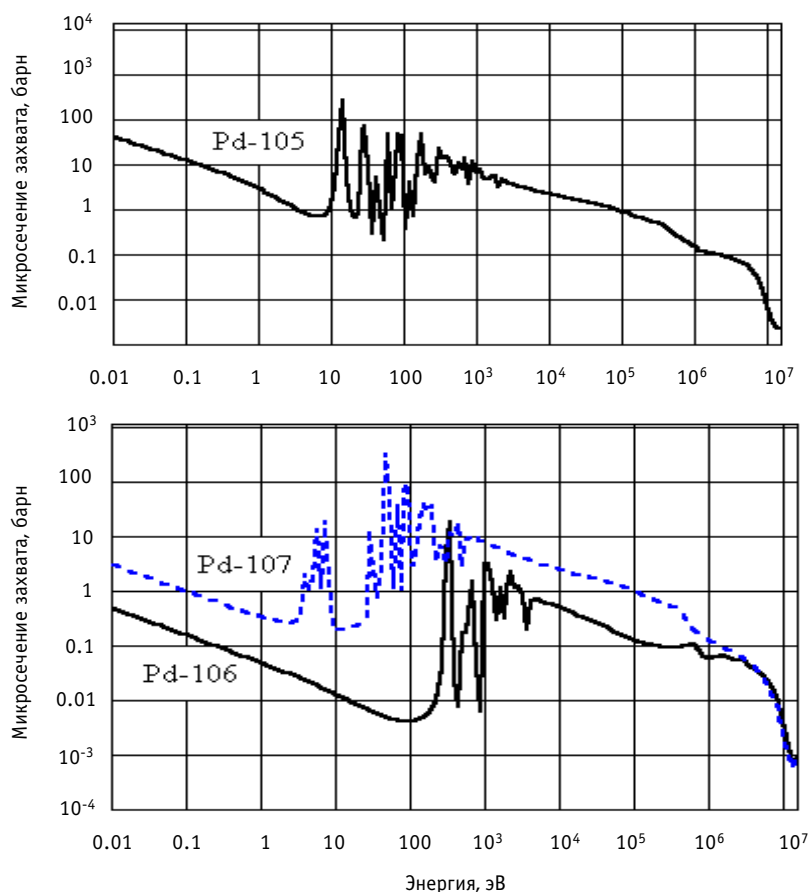


Рис. 2. Энергетические зависимости микросечений захвата нейтронов изотопами ^{105}Pd , ^{106}Pd , ^{107}Pd

процессы сжигания и воспроизводства трития в плазменной и бланкетной частях ТТЯУ полностью сбалансированы (с учетом потерь и естественного распада трития). Поэтому состав плазмы, а значит и спектр генерируемых термоядерных нейтронов (т.я.нейтр.), будут зависеть от композиции бланкета и его возможностей по воспроизводству трития. Изменение структуры и состава бланкетной части приведет к соответствующему изменению состава плазмы, а значит и энергетического спектра термоядерных нейтронов, который содержит две компоненты: жесткую (нейтроны с энергией 14 МэВ, генерируемые в dt-реакции) и сравнительно мягкую (нейтроны с энергией 2.45 МэВ, генерируемые в dd-реакции).

В дальнейшем исследовании рассматривались три варианта ТТЯУ. В первом варианте коэффициент наработки трития в расчете на одну термоядерную реакцию равен 1.05, равнокомпонентный состав плазмы 50%D, 50%T. Далее этот вариант обозначается как dt-источник нейтронов. Второй вариант - бланкет с уменьшенным воспроизводством трития [6], поэтому состав плазмы смещается в сторону увеличения дейтериевой фракции с соответствующим смягчением спектра термоядерных нейтронов. Далее этот вариант обозначается как ddt-источник нейтронов. В третьем варианте тритий, образующийся в бланкете, не используется в плазме; плазма состоит только из дейтерия, а спектр термоядерных нейтронов – только из мягкой компоненты (2.45 МэВ). Далее этот вариант обозначается как dd-источник нейтронов.

Структура бланкетной части ТТЯУ формировалась в соответствии со следующим принципом. Для трансмутации элементного палладия создавалась область с повышенной плотностью потока резонансных нейтронов. Размер и состав этой области подбирался так, чтобы спектр и величина плотности потока нейтронов соответствовали среднему времени жизни ^{107}Pd в нейтронном поле менее 50 лет. Естественно, часть нейтронов из трансмутационной области будет диффундировать в периферийную область бланкета и к первой стенке. Однако они будучи уже, по-существу, «низкопоточными» могут быть полезно использованы либо для трансмутации радионуклидов с достаточно большими сечениями захвата, либо для наработки трития и его последующего использования в плазменной части. В данной работе предпочтение было отдано второму варианту.

Из рис. 3 видно, что бланкетная часть состоит из трех типов областей: области размножения т.я.нейтронов, трансмутационной и периферийной. Область размножения т.я.нейтронов состоит из смеси свинца и лития, причем свинец предназначен для размножения жестких термоядерных нейтронов в (n,xn)-реакциях и для отвода тепла, а литий - для воспроизводства трития за счет поглощения нейтронов, диффундирующих в сторону первой стенки. Для ТТЯУ с dd-источником уже

$\Delta R(\text{см}):250$	50	2	15	2	4	2	2	20	20
Плазма 1,7%T+98,3%D	Вакуум	Сталь	99,2%Pb+0,8%Li	Зона трансмутации 1 35%Pd+10%Be+55%Pb	Be	Зона трансмутации 2 40%Pd+8%Be+52%Pb	Be	54,9%Pb+33,3%Li+ 11,7%Be	50%Be+50%Li

Рис. 3. Структура и составы зон цилиндрической модели ТТЯУ (для варианта с уменьшенной концентрацией трития в плазме)

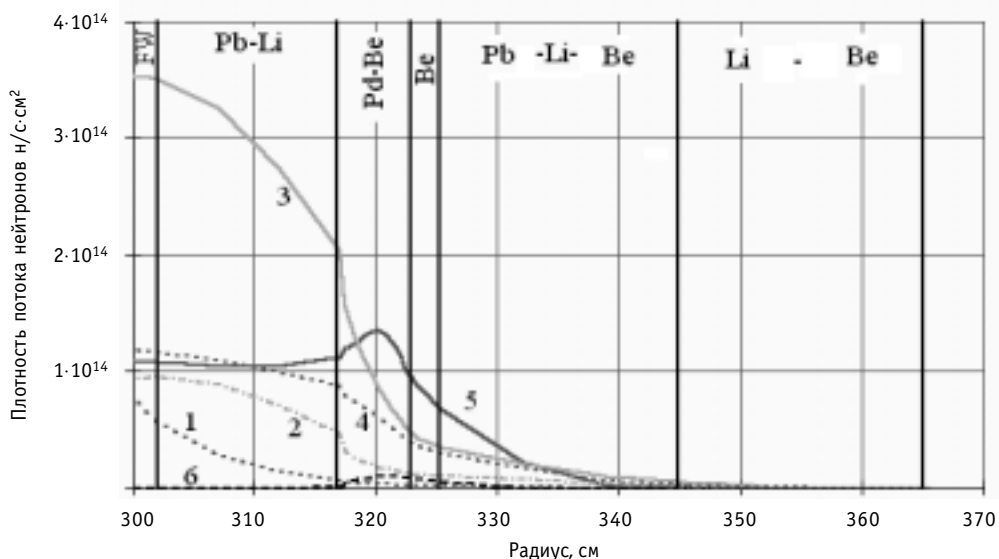


Рис. 4. Радиальные распределения плотности потока нейтронов для 6 энергетических групп: FW - первая стенка; 1-6 - номера групп с энергетическими интервалами: 10-14 МэВ (1 группа); 1-10 МэВ (2 группа); 0.1-1 МэВ (3 группа); 10-100 кэВ (4 группа); 5 эВ-10 кэВ (5 группа); ниже 5 эВ (6 группа)

нет необходимости иметь свинцовый размножитель, поскольку его присутствие только ослабляет поток термоядерных нейтронов с энергией 2.45 МэВ. В этом варианте трансмутационная область прилегает к первой стенке.

В периферийную область бланкета введен литий для наработки трития с последующим использованием в плазменной части.

Трансмутационная область включает в себя две зоны, содержащие элементный палладий и разделенные бериллиевой прослойкой. Трансмутационная область отделена от периферии бланкета отражателем из бериллия. Размеры и состав трансмутационных зон, толщина бериллиевой прослойки определялись отдельно для каждого рассматриваемого источника нейтронов. Объемная доля палладия в зоне трансмутации варьировалась в диапазоне 20-50%, а толщина бериллиевой прослойки - в диапазоне 2-5 см. На рис. 4 приведены радиальные распределения плотности потока нейтронов для шести энергетических групп в ТТЯУ с ddt-источником нейтронов. В области трансмутационной Pd-Be-зоны сформирована область с повышенной плотностью потока резонансных нейтронов.

Для рассмотренных источников т.я.нейтронов отношение концентраций трития и дейтерия n_t/n_d в плазме и отношение скоростей реакций R_{dt}/R_{dd} в зависимости от температуры и состава плазмы оценивались по формулам работы [7]. В то же время отношение R_{dt}/R_{dd} может быть определено из уравнения баланса реакций сжигания и образования трития соответственно в плазменной и бланкетной частях ТТЯУ:

$$R_{dt} - 0,5 * R_{dd} = \frac{1}{p_t} * (k_t^{14} * R_{dt} + 0,5 * k_t^{2,45} * R_{dd}), \quad (1)$$

где k_t^{14} , $k_t^{2,45}$ - коэффициенты накопления трития в бланкете в расчете на один термоядерный нейтрон с энергией 14 и 2.45 МэВ соответственно; p_t - коэффициент, учитывающий распад трития и его потери в топливном цикле (принято, что $p_t = 1.05$). Левая часть этого уравнения характеризует скорость сжигания трития в плазме (с учетом его образования в dd-реакции), а правая часть - скорость его

Таблица 3

Физические параметры нейтронных источников

Тип плазмы	dt	ddt	dd
k_t^{14} ($E_n=14$ МэВ)	1.04	0.72	-
$k_t^{2,45}$ ($E_n=2,45$ МэВ)	0	0.43	-
n_t/n_d	1	0.017	0
R_{dt}/R_{dd}	106	2.24	0
$K^{dpa}, 10^{-21} \left[\frac{\left(\frac{сн\alpha}{с} \right)}{\left(\frac{н}{см^2 \cdot с} \right)} \right]$	$K_{dt}^{dpa}=8.38$	$K_{ddt}^{dpa}=7.80$	$K_{dd}^{dpa}=4.73$
$J^+, 10^{13} \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$	4.50	4.86	7.97

наработки в бланкете с учетом распада и потерь в цикле. Совместное использование формул работы [7] и уравнения (1) позволило получить параметры плазмы и воспроизводства трития, приведенные в табл. 3.

Нейтронно-физические расчеты ТТЯУ проводились с помощью компьютерного кода SCALE 4.3 и библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-5 [8]. Оценивался баланс нейтронных реакций, вычислялись усредненные одногрупповые микросечения и плотность потока нейтронов в зоне трансмутации. Эти параметры затем использовались для решения уравнений выгорания элементного палладия с целью определения его равновесного изотопного состава, скорости трансмутации и производительности ТТЯУ. Уравнения выгорания палладия соответствуют цепочке изотопных переходов, представленной на рис.1, и непрерывной модели трансмутации, при которой облучение палладия сопровождается постоянной очисткой от стабильных продуктов трансмутации и постоянной подпиткой элементным осколочным палладием.

Как известно, интенсивность источника термоядерных нейтронов в существенной мере определяется и лимитируется работоспособностью первой стенки. Первая стенка подвергается воздействию интенсивного потока быстрых нейтронов, заряженных частиц и фотонов, которые приводят к изменению физических свойств материала стенки и его распылению. Кроме того, первая стенка работает при высоких температурах и при воздействии значительных статических и циклически изменяющихся механических нагрузок. В данной работе сопоставление вариантов между собой производилось при условии одинаковой скорости набора повреждающей дозы, обусловленной только воздействием нейтронов на материал первой стенки (число смещений на атом (СНА) в единицу времени). В качестве базовой нейтронной нагрузки на первую стенку ТТЯУ была использована величина, принятая в проекте ITER и равная 1 МВт/м², что соответствует току $4.5 \cdot 10^{13} \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ термоядерных нейтронов с энергией $E_n=14$ МэВ. Для трех рассматриваемых вариантов ТТЯУ оценивались коэффициенты, характеризующие скорость набора СНА, K_{dt}^{dpa} ($E_n=14$ МэВ) и K_{dd}^{dpa} ($E_n=2,45$ МэВ) для материала первой

стенки (нержавеющая сталь SS316LN). Эти коэффициенты были определены как скорость набора СНА в расчете на единицу плотности тока т.я.нейтронов через первую стенку. Нейтронные микросечения для расчета повреждающей дозы были приняты в соответствии с работой [9]. Результаты расчета приведены в табл. 3. Для ТТЯУ с ddt-источником нейтронов коэффициент, характеризующий скорость набора СНА, был оценен в соответствии со спектром источника т.я.нейтронов по следующей формуле:

$$K_{ddp}^{dpa} \equiv \frac{K_{dt}^{dpa} * R_{dt} + K_{dd}^{dpa} * 0,5 * R_{dd}}{R_{dt} + 0,5 * R_{dd}}.$$

Из табл. 3 видно, что коэффициенты, характеризующие скорость набора СНА для ТЯУ с ddt- и dd-источниками меньше, чем для ТЯУ с dt-источником. Это связано с более мягким спектром нейтронов, генерируемых первыми двумя источниками. В рамках нашего рассмотрения это означает, что ток термоядерных нейтронов через первую стенку для ТЯУ с ddt- и dd-источниками может быть увеличен по сравнению с dt-источником. Для этих двух вариантов ТЯУ значения тока т.я. нейтронов через первую стенку J^+ определялись из совместного решения уравнения (1) для соотношения скоростей реакций R_{dt} и R_{dd} в плазме и условия сохранения скорости набора СНА для материала первой стенки:

$$K_{dt}^{dpa} * R_{dt} + K_{dd}^{dpa} * 0,5 * R_{dd} = K_{dt}^{dpa} * R_{dt}^{ITER}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Некоторые результаты нейтронно-физического расчета процессов в бланкете для трех типов ТЯУ приведены в табл. 4.

Можно видеть, что ТЯУ с dt-источником характеризуется наибольшим выходом нейтронов (с учетом размножения) в расчете на одну реакцию синтеза по сравнению с двумя другими источниками. Однако для анализа важным является учет величины тока т.я. нейтронов через единичную поверхность первой стенки - J^+ (см. табл.3). Такой подход (т.е. в расчете на единицу поверхности первой стенки - FW) позволяет сопоставлять варианты ТЯУ при одинаковых размерах плазменной камеры и бланкета.

Из табл.4 видно, что вариант с ddt-источником является предпочтительным по расходу нейтронов на трансмутацию в расчете на один т.я.нейтрон (поглощение в палладии 0.7 нейтрона). Это связано с тем, что вариант с dt-источником (поглощение в палладии 0.5 нейтрона) страдает необходимостью повышенного расхода нейтронов на воспроизводство трития, а в варианте с dd-источником (поглощение в палладии 0.56 нейтрона) отсутствует канал размножения т.я. нейтронов.

Таблица 4

Нейтронно-физические процессы в бланкете ТЯУ

Тип источника	Выход нейтронов: т.я.нейтр.+ (n,2n)-размножение (в расчете на одну реакцию синтеза)	Поглощение в литии (в расчете на одну реакцию синтеза)	Поглощение в палладии (в расчете на одну реакцию синтеза)	Поглощение в палладии (в расчете на один т.я.нейтр.)	Поглощение в палладии в расчете на ед.пов.FW (отн. ед.)
dt	1+0.69	1.04	0.50	0.5	1
ddt	0.764+0.362	0.48	0.54	0.7	1.5
dd*	0.5 + 0	0.18	0.28	0.56	1.95

*Здесь имеется в виду dd-синтез, причем тритий, нарабатываемый в бланкетной части и в плазме, в расчет не принимается

В ТЯУ с dd-источником нейтроны, уходящие из зоны трансмутации, поглощались литием, что приводило к наработке трития, который в настоящем рассмотрении не учитывался. Эти нейтроны могут быть использованы для трансмутации ^{129}I и ^{99}Tc .

Расчеты показали также, что непроизводительные потери нейтронов в материале первой стенки не превышают 10% от генерируемых нейтронов.

Таблица 5

Микросечения изотопов и плотность потока нейтронов в ТТЯУ с ddt-источником

$\sigma(n,\gamma)$, барн	ТТЯУ с ddt-источником	
	1 зона	2 зона
^{104}Pd	0.573	0.87
^{105}Pd	1.69	2.86
^{106}Pd	0.36	0.5
^{107}Pd	1.72	2.94
^{108}Pd	0.58	1.09
^{110}Pd	0.35	0.54
^{109}Ag	8.49	20.91
$\phi, 10^{14} \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{сек})$	3.93	2.16

В табл. 5 приводятся одnogрупповые микросечения (n,γ) -реакций изотопов палладия, продукта трансмутации ^{109}Ag , а также плотности потока нейтронов, полученные в нейтронно-физических расчетах двух трансмутационных зон ТТЯУ с ddt-источником. Остальные варианты ТТЯУ характеризуются сходными нейтронными характеристиками трансмутационных зон. Как видно из табл. 5, микросечения ^{105}Pd и ^{107}Pd практически совпадают в обеих зонах. Это означает, что ^{105}Pd и ^{107}Pd будут

Таблица 6

Среднее время жизни изотопов, $1/(\sigma(n,\gamma)\cdot\phi)$, год

Изотоп	dt-источник		ddt-источник		dd-источник	
	1 зона	2 зона	1 зона	2 зона	1 зона	2 зона
^{104}Pd	115	150	141	168	122.7	161.5
^{105}Pd	38.3	45.2	47.8	51.5	39.9	46.6
^{106}Pd	191	271	227	296	200.9	300
^{107}Pd	38.7	46.7	47	50	40.4	47.9
^{108}Pd	69.1	70	138	70.7	89.6	81.7
^{110}Pd	201	272	233	270	216.2	283.4
^{109}Ag	6.9	6.2	9.5	7	5.7	6

Таблица 7

Равновесный изотопный состав палладия для ТТЯУ с ddt-источником

	ddt-источник		Состав подпитки
	1 зона	2 зона	
^{104}Pd	0,0579	0,0622	0,1548
^{105}Pd	0,0541	0,0517	0,2744
^{106}Pd	0,407	0,4654	0,2335
^{107}Pd	0,1085	0,1008	0,1907
^{108}Pd	0,3563	0,3031	0,1209
^{110}Pd	0,0161	0,0166	0,0257

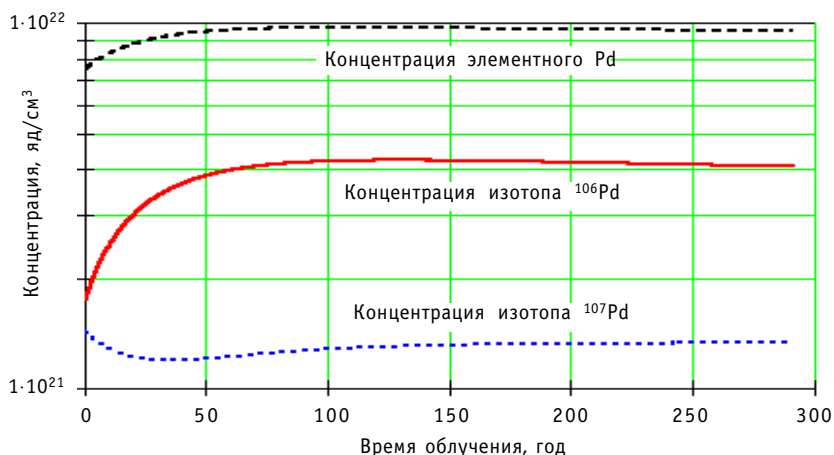


Рис. 5. Временное поведение концентраций основных изотопов палладия в бланкете ТТЯУ с ddt-источником (первая трансмутационная зона)

иметь близкую скорость трансмутации, но для свежего состава палладия (табл.1) доля ^{105}Pd в поглощении нейтронов будет значительно больше.

Необходимо заметить, что поскольку ^{109}Ag имеет большее сечение поглощения по сравнению с ^{107}Pd , длительное облучение может приводить к потере нейтронов в ^{109}Ag . Режим непрерывной очистки и подпитки свободен от этого недостатка.

Далее были определены средние времена жизни всех изотопов палладия и продукта трансмутации ^{109}Ag в нейтронном поле. Результаты приведены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что для всех источников трансмутационные зоны характеризуются средним временем жизни ^{107}Pd около 50 лет.

После нейтронно-физического расчета решалась система уравнений для изотопных переходов.

На рис. 5 представлен график, определяющий характер выхода на режим равновесной трансмутации для элементарного палладия и двух его изотопов ^{106}Pd и ^{107}Pd для бланкета ТТЯУ с ddt-источником нейтронов в первой трансмутационной зоне. Как видно из представленных зависимостей, выход на равновесную трансмутацию ^{107}Pd замедляется из-за медленного выхода на равновесие ^{106}Pd . Из табл. 6 видно также, что предшественники ^{107}Pd имеют разные времена жизни в разных трансмутационных зонах, поэтому разными могут быть и времена выхода на равновесный режим трансмутации.

В табл. 7 приведены равновесные изотопные составы палладия (Pd-вектор) в двух трансмутационных зонах бланкета ТТЯУ с ddt-источником и Pd-вектор в отработанном топливе ядерных реакторов. Другие рассмотренные трансмутационные зоны характеризуются сходными равновесными Pd-векторами. Видно, что равновесные Pd-векторы существенно отличаются от Pd-вектора подпитки. Видно также, что равновесные Pd-векторы смещаются в сторону стабильных мало поглощающих изотопов ^{106}Pd и ^{108}Pd , что может приводить к замедлению темпа трансмутации в бланкете.

Время выхода на равновесный режим трансмутации можно уменьшить, если в ТТЯУ загружать элементный палладий с изотопным составом, близким к равновесному. Для этого можно осколочный палладий, в составе которого только ^{105}Pd имеет относительно большое сечение захвата тепловых нейтронов (~60 барн), предварительно облучить, например, в экране быстрого реактора или электроядерной установки и таким образом сформировать изотопный состав палладия, достаточно близкий к равновесному.

Таблица 8

**Параметры равновесного режима трансмутации в ТТЯУ
в расчете на 1 и на 1000 м²**

Тип установки	На 1 м ² первой стенки			На 1000 м ² первой стенки		
	dt	ddt	dd	dt	ddt	dd
Равновесная загрузка Pd, т	0.0877	0.1967	0.2016	87.7	196.7	201.6
Парк обслуживаемых урановых LWR, ГВт (эл.)	0.0112	0.0160	0.0205	11.2	16	20.5
Скорость трансмутации элементного Pd, кг/год	0.3373	0.4804	0.6155	337.3	480.4	615.5
Скорость трансмутации ¹⁰⁷ Pd, кг/год	0.0643	0.0917	0.1173	64.3	91.7	117.3
Скорость наработки ¹⁰⁹ Ag, кг/год	0.3286	0.4677	0.5997	328.6	467.7	599.7

Из табл. 7 можно также заключить, что в режиме равновесной трансмутации доля ¹⁰⁵Pd в поглощении нейтронов меньше, чем при трансмутации состава подпитки. Это позволяет увеличить общую загрузку палладия в бланкет ТТЯУ. Так, например, из графика на рис. 5 видно, что равновесная загрузка увеличена по сравнению с начальной примерно в 1.5 раза.

В табл. 8 приведены параметры равновесного режима трансмутации элементного палладия в расчете на 1 м² первой стенки ТТЯУ, а также и в расчете на площадь поверхности первой стенки 1000 м², т.е. такой, как в проекте установки ITER. При этом варианты были выравнены по скорости набора повреждающей дозы материалом первой стенки. Видно, что парк реакторов, обслуживаемых такой ТТЯУ, в существенной мере определяется как ее плазменной частью (нейтронный источник), так и соответствующей структурой бланкета. Причем при переходе от использования равнокомпонентной dt-плазмы к плазме с пониженным содержанием трития в ней производительность ТТЯУ по трансмутации палладия существенно возрастает.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено формирование структуры бланкета для трансмутации осколочно-го палладия применительно к трем вариантам ТТЯУ: с равнокомпонентной dt-плазмой, с уменьшенной концентрацией трития в плазме и с dd-синтезом. Указанные варианты различаются спектром генерируемых термоядерных нейтронов.

В бланкетной части ТТЯУ сформирована область с повышенной плотностью потока резонансных нейтронов, в которой осуществляется трансмутация палладия со скоростью, соответствующей среднему времени жизни долгоживущего изотопа ¹⁰⁷Pd около 50 лет. Нейтроны, диффундирующие из этой области на периферию бланкета, а также к первой стенке, полезно используются для наработки трития и поддержания dt-реакции в плазме.

Бланкет ТТЯУ с dt-источником (коэффициент накопления трития - 1.05) характеризуется меньшей производительностью по трансмутации палладия, т.к. большая часть нейтронов используется для наработки трития. Повышение производительности трансмутации палладия может быть достигнуто за счет уменьшения содержания трития в составе плазмы (правда, ценой увеличения температуры зажигания плазмы) при соответствующем уменьшении содержания трития в топливном цикле.

Показано, что одна ТТЯУ с площадью поверхности плазменной камеры, такой же, как у ITER, способна будет обслуживать (в смысле трансмутации осколочного палладия) парк урановых энергетических LWR мощностью 11.2, 16 и 20.5 ГВт (эл.) для ТТЯУ с dt-, ddt- и dd-источниками соответственно. Для варианта ТТЯУ с ddt-источником термоядерная мощность составит 4% от суммарной мощности обслуживаемых урановых LWR.

Литература

1. *Salvatores M., Slessarev I., Tchistiakov A.* The Transmutation of Long-Lived Fission Products by Neutron Irradiation // Nuclear Science and Engineering. - 1998. - V. 130. - P. 309-319.
2. *Kobayashi K., Kawashima K., et al.* Applicability Evaluation to a MOX Fueled Fast Breeder Reactor for a Self-Consistent Nuclear Energy System: Proc. Second Intern. Symp. GENES-2 (October 29-November, 1, 1996, Tsuruga, Japan) // Progress in Nuclear Energy. - 1998. - V. 32. - № ?. - P. 681-688.
3. *Saito M., Chmelev A., et al.* Contribution of External Nuclear Sources in Excess Neutron Generation for SCNES: Proc. Second Intern. Symp. GENES-2 (October 29-November, 1, 1996, Tsuruga, Japan) // Progress in Nuclear Energy. - 1998. - V. 32. - № ?. - P. 697-705.
4. JEF-PC - A personal computer program for displaying nuclear data from the Joint Evaluated File library. User manual, version 2.0. - NEA/OECD, 1997.
5. *Benedict M., Pigford T.H., Levi H.W.* Nuclear Chemical Engineering - McGraw-Hill Companies, Second Edition, 1981. - P.359-362.
6. *Синцов А.Е.* Физические особенности формирования структуры высокопоточных бланкетов для обезвреживания долгоживущих отходов. Научная сессия МИФИ-2000: Сб. научн. тр. Москва-2000, Т.8. - С.968.
7. *Арцимович Л.А.* Управляемые термоядерные реакции. - М.: Физматлит, 1961.
8. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation. NUREG/CR-0200, ORNL/NUREG/CSD-2/R5, Oak Ridge, January 1997.
9. *Авраменко В.И., Конобеев Ю.В., Строкова А.М.* Нейтронные сечения для расчета повреждающей дозы в реакторных материалах // Атомная энергия. - 1984. - Т.56. - Вып. 3. - С. 139-141.

Поступила в редакцию 21.08.2000

A.V. Danilytshev, D.G. Elistratov, I.A. Kuznetsov, V.Yu. Stogov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 5 illustrations, 3 tables. – References, 10 titles.

The role of reactivity coefficients determining the feedback on the channel «temperature-reactivity» in the unprotected accidents of fast reactors is discussed. For the reactor cores with different capacity, configuration and structure the potential opportunities of BN-type reactors in UTOP and ULOF accidents are demonstrated. It is shown that traditional oxide fuel has exhausted its opportunities for creation of perspective cores with the maximal self-protection.

УДК 621.039.526

Influence of Calculation Accuracy of TCR Doppler Components on Substantiation of Fast Reactor Safety \ A.V. Danilytshev, V.Yu. Stogov, A.V. Tichomirov, V.A. Cherny; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 5 illustrations, 4 tables. – References, 6 titles.

The influence of discrepancy of Doppler constant on a substantiation of safety of fast reactors is submitted in the paper. The error observed in calculations with various Russian versions of ABBN data set and diffusion codes ($\pm 3\%$), as well as the maximum probable errors are discussed. Reliability of the domestic calculation instrument for obtained values is proved by comparison with the experiment on the SEFOR reactor.

УДК 621.039.526

Calculation-Optimization Investigations of Safety Characteristics of High Power Fast Reactors Cooled by Heavy Metals and their Alloys \ V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 2 illustrations. – References, 3 titles.

The possibilities of achievement of inherent self-protection of high power LMFRs cooled by lead, bismuth and their alloys are examined. The different variants of layout of the core self-protection are presented. Behavior of the LMFR in the most dangerous ATWS is analyzed.

УДК 621.039.536

Influence of Impurities of Silver, Tin and Antimony on Oxidation Potential of the Lead-Bismuth Coolant \ B.A. Shmatko, A.E. Rusanov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 9 titles.

Thermodynamics of interaction of metal impurities Ag, Sn and Sb with oxygen in an eutectic alloy lead-bismuth at temperature 500°C is investigated experimentally. Dependence of the melt Gibbs energy of concentration of each of impurities is defined by the electromotive force method.

УДК 621.039.6:539.17

Transmutation of Fission-Fragment Palladium in Blanket of Fusion Facility with Resonance Neutron Spectrum \ A.E. Sintsov, V.A. Apse, A.N. Shmelev, M. Saito, V.A. Artisiyk; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 11 pages, 5 illustrations, 8 tables. – References, 9 titles.

Transmutation of a radioactive fission product - palladium without preliminary radioactivity partitioning is considered. The fission-fragment palladium transmutation is assumed to be performed in a blanket of specialized fusion facility by irradiation of palladium isotopes in resonance neutron spectrum with transformation into stable silver and cadmium isotopes. Transmutation is considered in three variants of the fusion facility: with equal-components dt-plasma, with plasma containing a diminished amount of hyzone (with ddt-plasma) and with dd-plasma, i.e. the transmutation efficiency at transition from dt-plasma to dd-plasma.

УДК 621.039.526:621.039.59

Incineration of Transuranics in Hard Neutron Spectrum \ G.L. Khorasanov, A.I. Blokhin, and V.V. Sinitsa; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 6 pages, 1 illustration, 2 tables. – References, 6 titles.