

# «ХОЛОДНЫЙ» ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР С ПРЯМЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ НА ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ В РАМКАХ ПРОБЛЕМЫ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**В.Б. Ануфриенко, Г.Н. Казанцев, В.П. Ковалев, А.Г. Матков,  
Г.М. Пшакин, М.Я. Хмелевский**

*ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Одной из трудностей развития ядерной энергетики на современном этапе является проблема нераспространения ядерных материалов (ЯМ) и технологий, которые могут быть использованы для создания взрывных устройств, поэтому оправдано стремление усилить требования к оборудованию и энергетическим установкам, обеспечивающие более высокую степень сопротивления распространению или несанкционированному использованию ЯМ на всех этапах ядерного топливного цикла. Дополнительные возможности в этом отношении открываются при разработке новых способов прямого преобразования ядерной энергии в электрическую.

В данной работе рассмотрена концепция ядерного реактора с прямым (минуя тепловую стадию) преобразованием ядерной энергии в электрическую посредством сбора вторичных электронов (ВЭ), генерируемых в веществе осколками деления. Способ преобразования основан на использовании электрогенерирующих каналов (ЭГК), являющихся одновременно топливными сердечниками реактора, в виде тонкопленочных многослойных (сотни тысяч слоев) структур, состоящих из делящихся и конструкционных материалов. Коэффициент полезного действия (кпд) преобразования достигает 30%.

В работе рассматривается ячейка-преобразователь энергии осколков деления урана в электрическую, на основе которой сконструирован ЭГК, описывается облик одного из вариантов «холодного» реактора-преобразователя, намечены расчетно-экспериментальные исследования, необходимые для дальнейшей разработки конструкции и совершенствования методов расчета характеристик предлагаемого реактора-преобразователя.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия использование реакции деления ядра как источника энергии переживает трудный этап развития. Основные препятствия и проблемы, которые возникли на этом этапе, связаны с проблемами

© В.Б. Ануфриенко, Г.Н. Казанцев, В.П. Ковалев, А.Г. Матков, Г.М. Пшакин, М.Я. Хмелевский, 2001

- нераспространения ядерных материалов и технологий, которые могут быть использованы для создания взрывных устройств;
- экологической безопасности источников энергии и отходов, связанных с их созданием и эксплуатацией.

Ядерные энергетические установки и топливный цикл для них, созданные на первом этапе развития ядерных источников энергии, обладают рядом существенных недостатков, которые и привели к возникновению вышеупомянутых проблем при дальнейшем развитии. Вместе с тем наряду с направлениями в ядерной энергетике, которые привели к широкомасштабному промышленному ее развитию (АЭС на тепловых и быстрых нейтронах, судовые энергетические установки), шли достаточно успешные исследования по направлениям, использующим другие методы утилизации энергии деления ядра: термоэлектрические (ТЭГ), термоэмиссионные (ТЭП), магнитогазодинамические (МГД) методы.

Присущие каждому из этих способов характерные особенности обусловили и области их применения. Термоэлектрический метод оправдан при получении небольших мощностей (единицы кВт), магнитогазодинамический наиболее эффективен при получении мощностей в десятки и сотни мегаватт.

Термоэмиссионный метод занимает промежуточное положение (десятки, сотни кВт). Он, в частности, наиболее перспективен для использования в космических аппаратах как бортовой источник питания. Реакторы космического назначения должны быть, как правило, малогабаритными и высокотемпературными, что приводит к использованию в составе их активных зон высокообогащенного урана в виде таблеток и тугоплавких материалов.

Высокие температуры (660 – 2000°C) присущи всем трем способам непосредственного преобразования, что приводит к трудностям при выборе материалов и конструировании реакторов.

Важным элементом в международном режиме нераспространения ядерных материалов (ЯМ) является усиление требований к оборудованию и энергетическим установкам на всех этапах ядерного топливного цикла, затрудняющих возможность несанкционированного доступа к ЯМ.

Очевидно, является оправданным стремление к тому, чтобы будущие системы защиты топливных циклов и ядерных материалов могли обеспечить более высокую степень сопротивления распространению или несанкционированному использованию ЯМ.

Дополнительные возможности в этом отношении открываются при разработке новых способов прямого преобразования ядерной энергии в электрическую.

Нами в предыдущие годы была рассмотрена возможность прямого преобразования энергии осколков деления урана в электрическую посредством сбора вторичных электронов (ВЭ), генерируемых в веществе осколками деления. Коэффициент полезного действия достигает 30%. Прямой сбор ВЭ исключает тепловую стадию преобразования, при этом возможно использование низкообогащенного урана (рекомендуемое МАГАТЭ «безопасное» обогащение 20%) и снижаются требования к температурной стойкости материалов.

Предлагаемый способ прямого (минуя тепловую стадию) преобразования ядерной энергии в электрическую основан на использовании топливных сердечников в виде тонкопленочных (сотни тысяч слоев) структур, состоящих из делящихся и конструкционных материалов.

При изготовлении таких сердечников возможно применение полностью автоматизированных пучковых технологий нанесения покрытий из делящихся и конструкционных материалов без использования ЯМ в виде макроизделий, например, метод магнетронного распыления металлического урана или сплавов на его основе в низкочастотном и высокочастотном полях.

В данной работе рассматривается концепция ядерного реактора с прямым (минуя тепловую стадию) преобразованием ядерной энергии в электрическую, в которой предусмотрены дополнительные к существующим меры защиты ядерных материалов: пучковая технология изготовления сердечников ЭГК, исключающая контакты специалистов с макроизделиями из урана; выбор конструкции и состава ЭГК с минимальным количеством  $^{235}\text{U}$  (около 5 г на ЭГК) в максимально диспергированном состоянии; выбор состава активной зоны с обогащением урана по изотопу  $^{235}\text{U}$  не более 20% и общим количеством  $^{235}\text{U}$  в активной зоне после кампании меньше критической массы металлического  $^{235}\text{U}$  сферической формы даже с учетом увеличения динамической плотности материала в 2,5 раза.

Эти особенности технологии изготовления, состава и конструкции предлагаемых сердечников твэлов, ЭГК и активной зоны выгодно отличают их от существующих технологий как в свете проблемы нераспространения ЯМ, так и в решении ряда экологических вопросов.

Ниже рассматривается ячейка-преобразователь энергии осколков деления в электрическую, на основе которой может быть сконструирован электрогенерирующий канал (ЭГК), являющийся одновременно твэлом ядерного реактора, и описывается облик «холодного» реактора-преобразователя.

## **ЯЧЕЙКА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ НА ВТОРИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ**

Осколки деления урана при взаимодействии с веществом теряют до 90% энергии на ионизацию и возбуждение атомов среды, образуя каскад электронов, называемых по принятой терминологии вторичными, при этом вторичным электронам (ВЭ) передается свыше 60% энергии [1].

Энергетический спектр вторичных электронов, генерируемых осколками деления внутри среды, имеет вид спадающей кривой в диапазоне энергий от долей электрон-вольт до нескольких килоэлектронвольт. В вакууме после преодоления потенциального барьера спектр имеет максимум в области энергий 4 – 5 эВ (рис. 1). Средняя энергия спектра в вакууме составляет 230÷300 эВ, выход вторичных электронов из слоев толщиной несколько сотен ангстрем ~ 500÷600 эл/оск, спектры ВЭ из различных материалов близки по форме [1, 2].

Идея использовать вторичные электроны для разработки ядерной электрической батареи возникла в самом начале развития атомной энергетики.

Одна из первых батарей с изотопным источником  $\alpha$ -частиц описана в работе [3]. Коэффициент полезного действия такой батареи низкий.

Если заменить  $\alpha$ -источник на источник осколков деления, кпд батареи повышается до 0,1%, оставаясь все еще весьма низким.

Можно существенно увеличить кпд, используя параллельное соединение пар эмиттер-коллектор, состоящих из тонких, толщиной от 100 до нескольких сотен ангстрем, слоев. Такое решение предложено авторами работы [4] в 1981 г. для осколков деления и в работе [5] для изотопного  $\alpha$ -источника.

Выход ВЭ из тонкого слоя вещества пропорционален произведению потери энергии осколками деления в веществе на длину неупругого рассеяния ВЭ. Отсюда вытекают требования к выбору материалов эмиттера и коллектора.

Толщину эмиттера следует выбирать порядка глубины выхода вторичных электронов, что обеспечивает максимальный выход. Толщина коллектора выбирается порядка 3-5 длин неупругого взаимодействия электронов в материале коллектора, что обеспечивает близкий к 100% сбор электронов, приходящих на коллектор.

Материал эмиттера должен удовлетворять требованию, чтобы потери энергии оскол-

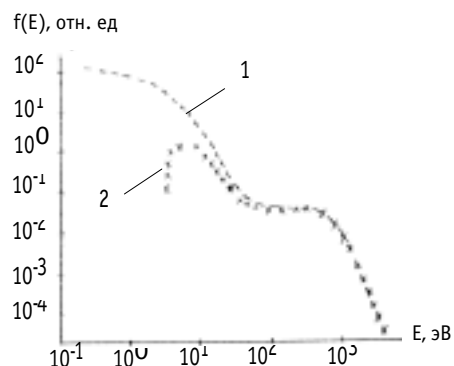


Рис. 1. Энергетические спектры вторичных электронов из тонкой пленки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [2]: 1 - спектр внутри мишени; 2 - спектр в вакууме; толщина мишени  $\sim 10^3 \text{ \AA}$

ком деления и длина неупругого рассеяния ВЭ в эмиттере значительно превышали потерю энергии осколком деления и длину неупругого рассеяния ВЭ в коллекторе. Этому требованию удовлетворяют пары уран-алюминий, уран-бериллий; возможны и другие комбинации.

На пробеге осколка  $\sim 10 \text{ мкм}$  укладывается несколько сотен ячеек эмиттер-коллектор, соответственно в несколько сотен раз увеличивается выход электронов и кпд возрастает до  $\sim 30\%$ .

Как вариант ячейки-преобразователя, который может быть осуществлен практически, в данной работе рассматривается ячейка эмиттер-диэлектрик-коллектор (ЭДК), где в качестве диэлектрика используется аэрогель  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , с пористостью  $\sim 99,4\%$  [6]. Эмиттером является уран с 20% обогащением по изотопу  $^{235}\text{U}$ , коллектором – алюминий. Коммутация большого количества таких ячеек обеспечивает достаточно высокую выходную мощность преобразователя (рис. 2).

Оценим кпд ячейки-преобразователя с эмиттером из урана толщиной  $100 \text{ \AA}$ , коллектором из алюминия толщиной также  $100 \text{ \AA}$  и диэлектриком из геля  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , с пористостью  $\sim 99\%$  толщиной  $0,4 \text{ мкм}$ , что эквивалентно по количеству материала плотной пленке  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной  $40 \text{ \AA}$ . Толщина пленки урана  $100 \text{ \AA}$  обеспечивает выход электронов, близкий к максимальному. По экспериментальным и расчетным данным [7] длина неупругого взаимодействия электронов в алюминии для основной части спектра вторичных электронов составляет  $5 \div 25 \text{ \AA}$ . Коллектор толщиной  $100 \text{ \AA}$  будет собирать практически 100% приходящих электронов.

Эмиттер и коллектор в ячейке ЭДК образуют емкость  $C$ , которая заряжается током вторичных электронов до некоторого напряжения  $V$ .

В эквивалентной схеме эмиттер представлен источником тока вторичных электронов, который генерирует ток  $I_0$  при малых напряжениях и значительно меньший ток  $I = I_0 \cdot (V)$  при высоких напряжениях, когда тормозящее поле отталкивает электроны низкой энергии. Коэффициент  $K(V) \leq 1$ . Эквивалентная схема включает в себя параллельно соединенные сопротивления изоляции  $R_i$  и внешней нагрузки  $R_e$ .

Коэффициент  $K(V)$ , если принять угловое распределение вторичных электронов косинусоидальным, для плоских бесконечных электродов определяется соотношением

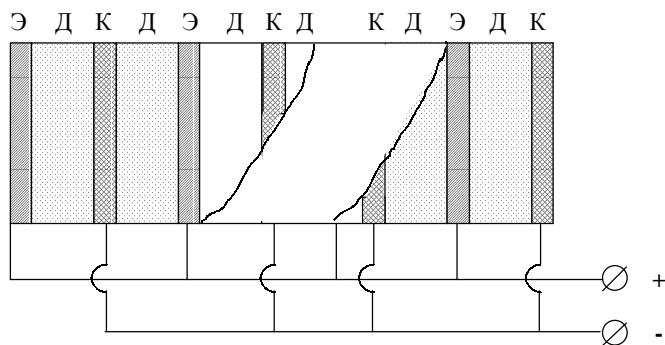


Рис. 2. Схема преобразователя ЭДК

$$K(V) = \frac{\int_0^{E_{\max}} f(E) \left(1 - \frac{dV}{E}\right) dE}{\int_0^{E_{\max}} f(E) dE},$$

где  $f(E)$  – спектр вторичных электронов;  $E_{\max}$  – максимальная энергия электронов в этом спектре;  $V$  – разность потенциалов между эмиттером и коллектором.

Коэффициент полезного действия ячейки определяется выражением

$$\eta = \frac{I \cdot V}{W},$$

где  $I$  – ток;  $V$  – напряжение на сопротивлении нагрузки;  $I \cdot V$  – полезная мощность, которая может быть снята с нагрузки;  $W$  – мощность, теряемая в ячейке осколком деления.

Для ячейки ЭДК

$$W = \left(\frac{dE}{dx}\right)_J \cdot T_J + \left(\frac{dE}{dx}\right)_D \cdot T_D + \left(\frac{dE}{dx}\right)_K \cdot T_K,$$

где  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_T$  – потери энергии осколком в соответствующих слоях ячейки и толщины этих слоев. Значение  $I_0$  определяется выходом ВЭ  $Q$  и рассчитывается из соотношения  $I_0 = Q \cdot e$ , где  $e$  – заряд электрона.

Оценки кпд ячейки проводились в предположении, что спектр ВЭ близок к спектру 2 на рис. 1, при этом  $K \approx 0,4 \div 0,3$  в области напряжений  $V = 200 \div 400$  В.

Значения  $V = 200 \div 400$  В достижимы, если принять электрическую прочность аэрогеля  $Al_2O_3$  близкой к электрической прочности тонких пленок ( $5 \cdot 10^6 \div 10 \cdot 10^6$ ) В/см. Оценки проводились для средних значений потерь энергии осколком:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_J = 1,5 \cdot 10^3 \text{ эВ/Å}; \quad \left(\frac{dE}{dx}\right)_L = 0,8 \cdot 10^3 \text{ эВ/Å}; \quad \left(\frac{dE}{dx}\right)_K = 0,6 \cdot 10^3 \text{ эВ/Å};$$

При этих параметрах с учетом пористости  $Al_2O_3$  получаем значение  $\eta \approx 25 \div 30\%$ .

Коммутируя ячейки ЭДК, мы можем сконструировать электрогенерирующий канал (ЭГК) заданной мощности и размеров.

Оценим количество ячеек ЭДК площадью  $1 \text{ см}^2$  каждая для варианта ЭГК в виде коаксиальных алюминиевых трубок, между которыми расположен рулон из ленты ЭДКД. Поперечное сечение ЭГК представлено на рис. 3.

Толщина стенок алюминиевых трубок выбрана равной  $0,1 \text{ см}$ , лента ЭДКД помещается в кольцо шириной  $\Delta r = 0,25 \text{ см}$ . Толщина ячейки ЭДКД составляет  $\sim 8 \cdot 10^{-5} \text{ см}$ , в кольцо шириной  $0,25 \text{ см}$  при плотной намотке помещается  $n \approx 3 \cdot 10^3$  слоев. Беря высоту ЭГК  $1 \text{ м}$  и средний радиус слоя  $\bar{r} = 0,625 \text{ см}$  получим число ячеек в ЭГК  $N \approx 10^6$ .

Ниже приводятся оценки параметров реактора, достигающего критичности с помощью замедлителя  $H_2O$ .

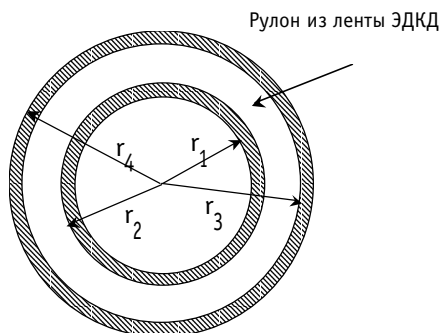


Рис. 3. Поперечное сечение ЭГК:  $r_1 = 0,4 \text{ см}$ ;  $r_2 = 0,5 \text{ см}$ ;  $r_3 = 0,75 \text{ см}$ ;  $r_4 = 0,85 \text{ см}$

## ОБЛИК РЕАКТОРА С ПРЯМЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

При компоновке активной зоны реактора-преобразователя на основе рассмотренного ЭГК принималось во внимание, что в состав электрогенерирующих каналов, из которых комплектуется активная зона, входит алюминий, имеющий относительно низкую температуру плавления  $660^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, доля  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в ячейке активной зоны составляет  $\sim 0,5\%$ . Поэтому для создания критической массы требуется достаточно большой объем активной зоны с тепловым спектром нейтронов и в качестве теплоносителя и замедлителя взята вода.

В качестве делящегося материала выбирается металлический уран с обогащением по изотопу  $^{235}\text{U}$  не выше 20%, в соответствии с рекомендациями МАГАТЭ.

Конструктивная схема реактора представлена на рис. 4 (поперечное сечение 1/6 части реактора).

Геометрические размеры активной зоны:  $D=H=1$  м, толщина отражателя 15 см – слой воды (темные полосы, рис. 4) и алюминия (светлые полосы). Полное число ЭГК в активной зоне 3049. Массогабаритные характеристики и  $K_{\text{эфф}}$  реактора даны в табл. 1. Расчеты реактора проводились по программе ММКФК-2 [8].

Таблица 1

### Массогабаритные характеристики и $K_{\text{эфф}}$ реактора

| № п/п | $D_{\text{а.з.}}$ , см | $H_{\text{а.з.}}$ , см | $\Delta H$ торцевых отражателей, см | $G_{\text{U5}}$ , кг | $G_{\text{U8}}$ , кг | $G_{\text{AL}}$ , кг | $G_{\text{H}_2\text{O}}$ , кг | $G_{\text{реак.}}$ , кг | $K_{\text{эфф}}$ |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------|
| 1     | 100                    | 100                    | 20                                  | 13,37                | 55,6                 | 2700                 | 730                           | 3500                    | 1,05             |
| 2     | 100                    | 100                    | 20                                  | 11,57                | 55,6                 | 2700                 | 730                           | 3500                    | 1,001            |

Как видно из табл. 1, в реактор загружается  $\sim 13,4$  кг  $^{235}\text{U}$ , что дает  $K_{\text{эфф}}=1,05$ . Допустимое выгорание урана составляет не более 1,8 кг.

Ограничения параметров реактора определяются теплофизическими свойствами и радиационной стойкостью материалов и существенным образом зависят от снимаемой с ЭГК мощности. Если снимаемая с реактора электрическая мощность принимается рав-

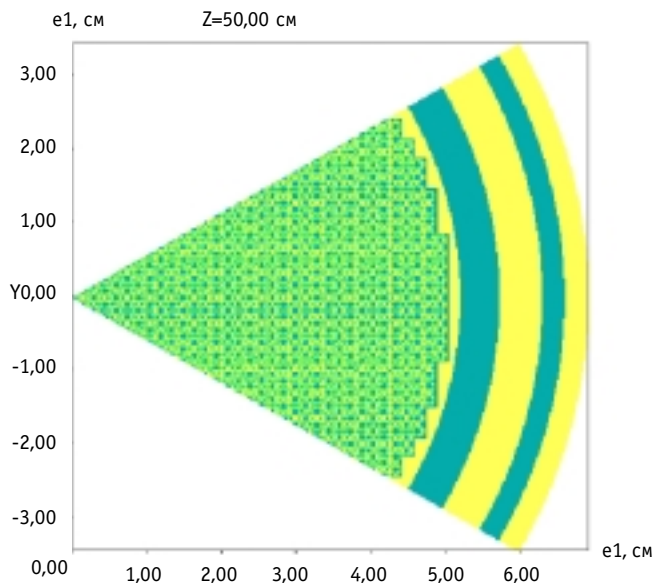


Рис. 4. Поперечное сечение реактора. Теплоноситель – вода, отражатель – слой воды и алюминия. Полное количество электрогенерирующих каналов в реакторе – 3049

ной 100 кВт, то при  $\eta = 25\%$  тепловая мощность реактора составит 400 кВт, а время непрерывной работы ~12 лет. Расчеты показали, что в этой ситуации особых ограничений по температурам элементов ЭГК нет. Эта ситуация сохраняется до мощности реактора ~1000 кВт (тепловая мощность ~4000 кВт). При большей мощности реактора требуются специальные меры для снятия выделяемого тепла и устранения опасности перегрева ЭГК. При мощности реактора 1000 кВт (электрических) его ресурс снизится до 1,2 года.

Оценим мощность ячейки и ЭГК для этого случая. При количестве ЭГК 3049 тепловая мощность, соответствующая одному ЭГК, составит  $W \approx 1$  кВт, а количество ячеек ЭДКД в одном ЭГК согласно данным табл. 1 будет  $N = 1,2 \cdot 10^6$ , таким образом тепловая мощность ячейки  $W_0 \approx 1,1 \cdot 10^{-3}$  Вт. Этой мощности соответствует поток нейтронов с энергией больше 0,1 МэВ  $\sim 10^{13}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . При ресурсе 1,2 года флюенс нейтронов  $\Phi$  составит  $\Phi = 3,5 \cdot 10^{20}$  нейтр./ $\text{см}^2$ .

Для повышения ресурса реактора при увеличении его мощности требуется увеличить загрузку  $^{235}\text{U}$ . При невозможности увеличения обогащения урана по изотопу  $^{235}\text{U}$  увеличить количество  $^{235}\text{U}$  возможно за счет увеличения объема реактора. В табл. 2 приведены параметры реактора с высотой активной зоны 1,5 м.

Таблица 2

**Массогабаритные характеристики и  $K_{эф}$  реактора**

| № п/п | Д <sub>а.з.</sub> , см | Н <sub>а.з.</sub> , см | $\Delta H$ торцевых отражателей, см | G <sub>У6</sub> , кг | G <sub>У8</sub> , кг | G <sub>АЛ</sub> , кг | G <sub>Н20</sub> , кг | G <sub>реак.</sub> , кг | K <sub>эф</sub> ф |
|-------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|
| 1     | 100                    | 150                    | 20                                  | 20,60                | 83,5                 | 3600                 | 985                   | 4600                    | 1,10              |
| 2     | 100                    | 150                    | 20                                  | 16,60                | 83,5                 | 3600                 | 985                   | 4600                    | 1,01              |

Из табл. 2 видно, что в реактор загружается ~20,6 кг  $^{235}\text{U}$ , что дает  $K_{эф}=1,1$ . Допустимое выгорание урана составляет около 4 кг.

С таким количеством выгорающего урана обеспечивается электрическая мощность ~300 кВт в течение 10 лет.

Оценивая количество ячеек в ЭГК, мощность ЭГК, ячейки и флюенс нейтронов для этого случая, получаем

- количество ячеек в ЭГК  $N = 1,8 \cdot 10^6$  ;
- тепловая мощность ЭГК  $W \approx 400$  Вт;
- тепловая мощность ячейки  $W_0 \approx 2,0 \cdot 10^{-4}$  Вт;
- флюенс нейтронов за 10 лет  $\Phi \approx 10^{21}$  нейтрон./ $\text{см}^2$ .

Полученные значения флюенсов нейтронов могут служить отправным пунктом при оценке радиационной стойкости материалов ячейки.

Следует отметить, что приведенные характеристики реактора-преобразователя с «вакуумной» изоляцией электрогенерирующих каналов, имеющих форму трубок, являются предварительными и выполнены для оценки облика реактора. Более перспективным может оказаться плоская форма в виде одного электрогенерирующего канала, пронизанная трубками, которые представляют собой электроды и одновременно служат каналами для прокачки теплоносителя (воды или жидкого металла). Количество каналов может быть минимизировано в соответствии с тепловой и электрической мощностью реактора.

На данном этапе не рассматривался вопрос о системе регулирования, которая может быть выполнена в виде поворотных органов с поглощающими пластинами или поглощающих стержней, вводимых в активную зону. Не рассматривались также вопросы, связанные с управляемостью реактора как ядерного устройства и как источника электроэнергии. Не рассмотрены вопросы ядерной и радиационной безопасности. Все это

целесообразно рассмотреть при конкретизации облика реактора. Потребуется разработка конструкции и специальной технологии изготовления многослойных тонкопленочных ЭГК.

С целью комплексного подхода к проблеме нераспространения ЯМ нами проанализирована возможность использования «сухих» технологий переработки облученного ядерного топлива применительно к рассматриваемому составу материалов активной зоны. Как известно, с точки зрения радиационной безопасности «сухие» технологии практически гарантируют нераспространение ЯМ, т.к. обеспечивают их очистку от радионуклидов деления не более чем на 2–3 порядка. В рамках рассматриваемой проблемы технология «сухой» переработки отработанного ядерного топлива состоит в сухом хлорировании компонентов урановых композиций (U металлический +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + Al + продукты деления) парами четыреххлористого углерода при температуре 600 – 650°C с фракционным разделением летучих хлоридов урана, матричных компонентов сплава (Al и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), продуктов деления (ПД) на солевых насадках NaCl – KCl с последующим расплавлением ураносодержащей фракции в электролизере и получением металлического урана на катоде. При обработке расплава хлоркислородной газовой смесью можно перевести восстановленные формы урана ( $\text{UCl}_4$ ,  $\text{UCl}_5$ ) в уранилхлорид и получить диоксид урана по хорошо освоенной электрохимической технологии с использованием солевых расплавов.

В мировой практике накоплен значительный опыт по разработке конструкций электролизеров для получения металлического урана, их изготовлению и эксплуатации в условиях перчаточных боксов. Этот опыт может быть использован при создании опытно-промышленной установки по переработке сердечников с матрицей из металлического алюминия и оксида алюминия.

Для дальнейшей разработки и совершенствования методов расчета характеристик реактора-преобразователя необходимы расчетно-экспериментальные исследования

- радиационной стойкости ячейки-преобразователя в смешанных полях излучений – изучение влияния на характеристики ячейки одновременного облучения осколками деления, нейтронами, электронами,  $\gamma$ -квантами;
- зависимости электрического сопротивления и электрической прочности аэрогеля  $\text{Al}_2\text{O}_3$  от температуры в смешанных полях излучений.

По нашему мнению разработка предлагаемого типа реактора-преобразователя внесет существенный вклад в проблему нераспространения ядерных материалов.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 1597Р.

## Литература

1. *Pferdekamper K.E.* Clere H.-G. //Z.Phys. – 1977. - Bd A 280. - S. 155.
2. *Дьяченко П.П., Рыков В.А.* Препринт ФЭИ № 2255. - Обнинск, 1992.
3. *Корлисс У., Харви Д.* Источники энергии на радиоактивных изотопах. - М.: Мир, 1967.
4. *Ануфриенко В.Б., Засорин И.П., Ковалев В.П., Исаев В.И.* Авторское свидетельство № 1019964, 1981.
5. *Балебанов В.М., Карась В.И., Моисеев С.С. и др.* Вторично-эмиссионный радиоизотопный источник тока//Атомная энергия. - Т.84. - Вып. 5. - С.398, 1998.
6. *Лаврова О.В., Мартынов П.Н., Сысоев Ю.Н.* Способ получения аэрогеля оксида алюминия. Патент РФ № 2092437, Приоритет от 19.12.95.
7. *Ritchie R.H. et al.* «Rad. Res», 1975, v. 64, p. 181.
8. *Полевой В.Б., Леонтьев В.В., Овчинников А.В. и др.* Базовый пакет программ комплекса ММКФК-2 для решения методом Монте-Карло задач переноса нейтронов в физике реакторов (ММКФК-2-BASE). ОФАП ЯР № 00371, Москва, 1996.

Поступила в редакцию 4.04.2001



## ABSTRACTS OF THE PAPERS

---

### УДК 519.714.1:621.039.58

*Non-asymptotic Model for System Reliability with Built-in Control* \A.V. Antonov, A.V. Dagayev, V.A. Chepurko; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 7 pages, 5 illustrations, 1 table.- References, 6 titles.

The paper considers method of calculation for system reliability with a build-in control of trouble-free operation subjected to recovery after failure. The model is developed permitting to calculate non-asymptotic and asymptotic availability coefficient. The comparison of reliability indexes is performed, and the literature is briefly summarized for given subject.

### УДК 519.217:621.039.58

*The Development of Optimization Criterion for NPP Unit Life Time* \O.M. Gulina, A.A. Zgiganshin, V.A. Chepurko; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 5 pages, 2 illustrations.- References, 7 titles.

There is developed the optimization criterion for NPP unit lifetime depending on both safety demands and economical cost. The new results for the operation cost due to equipment unreliability are obtained by using of Markovian model. To make decision about life time extension the method of zero level crossing is suggested for different kinds of information about criterion parameters.

### УДК 621.039+621.039.586

*Application of Neural Network for Main Circulation Pumps Diagnostic* \S.T. Leskin, V.V. Valuy, D.G. Zarugin Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 7 pages, 4 illustrations, 1 table.- References, 8 titles.

The application of Neural Network for VVER 1000 Main Circulation Pumps Diagnostic is discussed. On The base of selected Model and principles of education the Neural Network is developed. The results of application of the Neural Network, previously educated on the fifth block NV NPP and the first block Kalinin NPP data, are presented. The sensitivity analyze of the Neural Network for the entering data was carried out to outline the most influencing on the education process of MCP anomalies conditions recognizing.

### УДК 621.039.526

*«Cold» Nuclear Reactor with Direct Nuclear - Electric Energy Conversion Based on Secondary Electrons within the Frame of Nuclear Material Non – Proliferation* \V.B. Anufrienko, G.N. Kazantsev, V.P. Kovalev, A.G. Matkov, G.M. Pshakin, M.Ya. Khmelevsky; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 8 pages, 4 illustrations, 2 table.- References, 8 titles.

One of the problems in developing nuclear power at the current stage consists in non - proliferation of nuclear materials (NM) and technologies which can be used for constructing explosive devices.

So the attempt to make the equipment and power units requirements more stringent is justified. These requirements could provide a higher level of resistance to proliferation and unauthorized use of NMs at all the stages of nuclear fuel cycle. In this respect additional possibilities are revealed when developing new ways of direct conversion of nuclear power into the electric one.

This paper considers the concept of a nuclear reactor with direct (avoiding a thermal stage) conversion of nuclear energy into electric energy by means of accumulation of secondary electrons (SE) generated in the substance by fission fragments. The conversion technique is based on the use of electrogenerating elements (EGEs) which simultaneously are reactor fuel cores in the form

of fine - film multilayer structures (hundred thousands of layers) which consist of fissile and structural materials. The conversion efficiency is up to 30 %.

In the paper consideration is given to a cell - converter of uranium fission fragments energy into electric energy, based on which the EGE has been designed. Besides, one of the options of «cold» reactor - converter is described as well as some calculational and experimental studies are indicated. They are required for the further development of design and for perfection of methods for calculation of proposed reactor -converter parameters.

#### **УДК 504.064+504.423**

*Procedure of Sensitivity and Uncertainty Estimation for the box Model of Pollution Transport by Sea \ A.N. Ershov, D.A. Kamaev, O.V. Shershakov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 7 pages, 6 illustrations.- References, 6 titles.*

The present work is devoted to elaboration of the procedure of sensitivity and uncertainty estimation for the box model of pollution transport by sea. For sensitivity estimation of the model relatively to small perturbations of input data and parameters, the transition to conjugated system of equations have been used. The problem of uncertainty estimation of modeling, caused by inexact knowledge of model parameters and input data. This problem removes to laborious problem of global optimization. In respect to the box model such approach is inapplicable, because of large dimension of parameters space. There is shown the procedure of finding conservative estimates of uncertainty in the work, based on interval mathematics. There are demonstrated the results of computations, illustrating the efficiency of suggested procedure of uncertainty estimation.

#### **УДК 504.4:621.039**

*The Modeling of the Radionuclide Transportation in Reservoirs Located in the Head Part of the East Ural Radioactive Trace \ P.M.Stukalov, A.I.Smagin; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 8 pages, 3 illustrations.- References, 7 titles.*

It is presented the results of modeling for the radioactive contamination dynamics of the reservoirs located in the East Ural trace head part. The satisfactory comparison of experimental data and calculated results is shown.

#### **УДК 621.039.73**

*Estimation of the research light water reactor release influence on the population exposure \ M. Moniri, V.E. Cherkashin; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 2001. - 7 pages, 2 illustrations, 6 tables.- References, 8 titles.*

The preliminary results of the calculation of the population irradiation dose values are presented during the normal operation and the hypothetical design accident of the light water research reactor. The thermal reactor power was adopted equal to 10 MW. The stack height is equal to 100 m. The supposed reactor site is located near Isfahan city (Iran). The radionuclide composition of the reactor for the different situations are estimated. The collective dose values for the largest cities located near this reactor are in the range from  $2.17 \cdot 10^{-6}$  man\*Sv/yr (Falavarjan city) to  $1.45 \cdot 10^{-4}$  man\*Sv/yr (Isfahan city). The average annual individual dose value for this region is equal to  $1.0 \cdot 10^{-11}$  Sv/yr approximately and it is not higher than 0.0005% of the external irradiation dose connected with the natural radionuclides and with the "global" radioactive environment contamination. Annual  $^{137}\text{Cs}$  fallout is in the range of 0.02-0.2 mBq/m<sup>2</sup>, which is equal to  $10^{-7}$ -th fraction of the accumulated soil activity after the atmospheric nuclear tests.

#### **УДК 621.039.51**

*On Some Modifications of the Point Reactor Kinetics Equations \ B.D.Abramov; Editorial board of Journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetika" (Communications of Higher*