

P2-2001-125

В.С.Барашенков¹, В.П.Филинова²

**ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ СИСТЕМЫ
ОТ СОСТАВА ТОПЛИВА МОХ**

Направлено в журнал «Атомная энергия»

¹E-mail: barash@cv.jinr.ru

²E-mail: filinova@cv.jinr.ru

Гарантированно безопасное производство атомной энергии, экономически выгодная инсинерация плутония и переработка долгоживущих радиоактивных отходов в настоящее время в значительной степени связываются с электроядерными системами, объединяющими высокоэнергетический ускоритель и подкритическую сборку. Хотя все основные компоненты таких систем уже давно используются в атомной технике и хорошо изучены, их объединение в установки с мощностью в сотни и тысячи МВт, с мишенью, способной длительное время выдерживать высокие температуры и огромные дозы сильноионизирующей радиации, с напряженным теплосъемом в активной зоне, требует предварительной технологической проработки на экспериментальных сборках с небольшой тепловой мощностью, которые не требуют сильноточных ускорителей и могут быть созданы уже на основе существующих машин с микроамперными токами [1-4].

Одна из таких экспериментальных установок с проектной тепловой мощностью в 10 — 20 кВт создается в Дубне на базе 660-МэВного фазотрона ОИЯИ с подкритической активной зоной, содержащей уран-плутониевое топливо МОХ в стандартных ТВЭЛах, используемых в быстрых реакторах [5,6]. Для увеличения выхода нейтронов и коэффициента энергетического усиления $G = (Q - E)/E$, где Q — энергосвечение, E — энергия бомбардирующих протонов, активная зона окружена слоем бериллия с толщиной около 20 см (рис. 1). Оценки показывают, что для удаления тепла, выделяющегося в активной зоне и расположенной в ее центре свинцовой (или свинцово-висмутовой) мишени, вполне достаточно воздушного охлаждения, аналогичного тому, что применяется для охлаждения работающего в Дубне импульсного быстрого реактора ОИЯИ ИБР-30. Предполагается, что система будет работать с безопасной величи-

ной коэффициентом мультипликации нейтронов $K_{eff} \approx 0,94$.

Поскольку топливо MOX содержит примесь изотопа ^{240}Pu , снижающего величину Q и K_{eff} , важно выяснить ее влияние на параметры системы, а также оценить величину возможного компенсирующего увеличения содержания плутония в ТВЭЛах активной зоны. С этой целью мы выполнили серию математических экспериментов по исследованию режимов работы проектируемой установки при различных значениях относительных концентраций диоксидов плутония и урана в топливе MOX $\alpha = \text{PuO}_2/\text{UO}_2 \simeq \text{Pu}/\text{U}$ и изотопов плутония $\eta = {}^{240}\text{PuO}_2/{}^{239}\text{PuO}_2 \simeq {}^{240}\text{Pu}/{}^{239}\text{Pu}$ (при одинаковой плотности диоксидов плутония и урана).

Расчеты выполнены методом Монте-Карло на основе разработанного в ЛИТ ОИЯИ программного комплекса CASCAD [7], моделирующего транспорт высокоэнергетических частиц в гетерогенных мультиплицирующих средах со сложной геометрией. Неупругие адрон-ядерные взаимодействия при энергиях $E > 50$ МэВ моделировались на основе каскадно-испарительной модели с учетом конкуренции процессов испарения и деления высоковозбужденных остаточных (послекаскадных) ядер и образующихся при делении возбужденных ядер-осколков. В области $E = 10,5 - 50$ МэВ использовался механизм образования компаунд-ядра в результате захвата мишенью налетающего адрона (как правило, протона или нейтрона, мезонов в этой области при начальной энергии $E \leq 1$ ГэВ очень мало) и последующего распада релаксировавшего (равновесного) компаунд-ядра. Транспорт низкоэнергетических нейтронов в области энергий $E < 10,5$ МэВ моделировался в 26-групповом приближении с по-

мощью стандартной системы констант [8]. В каждом случае разыгрывалось по 2000 событий¹.

При вычислениях каждая из зон, входящих в состав электроядерной системы (см. рис. 1), гомогенизировалась. Для упрощения расчетов шестигранная активная зона с топливом МОХ аппроксимировалась двумя цилиндрами с радиусами, равными соответственно радиусам вписанной и описанной окружностей $R_1 = 23$ см и $R_2 = 26,6$ см. Предполагалось, что в состав топлива МОХ входит естественный уран с 0,072%-м содержанием ^{235}U , а средняя плотность МОХ равна $8,64\text{г/см}^3$. Мы предполагали также, что для радиационной защиты используется бетон с большим содержанием железа (около 88% по весовой доле). Конструктивно железо может быть в виде тонких листов внутри легкого бетона, но для упрощения расчетов считалось, что железо гомогенно распределено по всей толщине бетона. Следует отметить, что результаты расчета чувствительны к процентному содержанию железа.

Сравнительные расчеты показали, что абсолютные значения моделируемых параметров K_{eff}, Q, G , выхода нейтронов N заметно изменяются в зависимости от конструктивных изменений установки (толщины каналов для экспериментальных измерений в активной зоне, варьирования длины ТВЭЛов, толщины бериллия, слоев свинца, бетона и т. д.), однако их относительные значения, по отношению к некоторой “средней конструкции”, более устойчивы и применимы не только к проектируемой в Дубне установке, но и к другим, не сильно отличающимся по своей принципиальной конструкции электроядерным системам.

¹При энергии протонного пучка $E = 1$ ГэВ расчет каждой тысячи событий на компьютере PENTIUM2-400 МГц, включая расчет нейтронных спектров, выхода изотопов и пространственного распределения тепловыделения, занимает 8 — 9 часов в зависимости от деталей конструкции и химического состава системы. При $E = 100$ МэВ время расчета уменьшается на порядок.

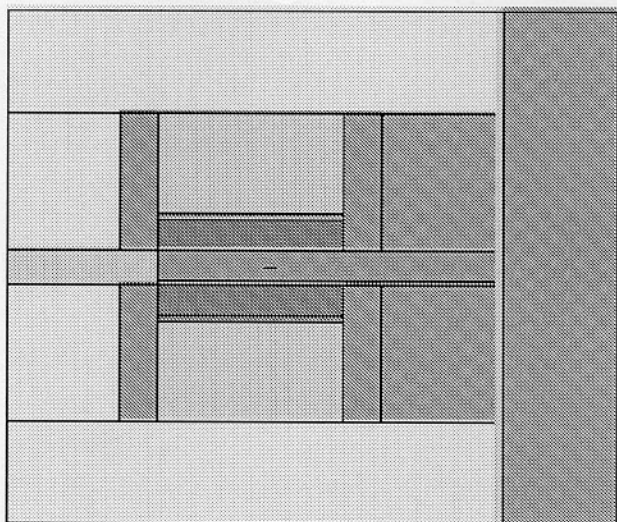


Рис. 1. Продольный разрез электроядерной установки ОИЯИ. Центральная свинцовая мишень с радиусом 4 см в тонкой (2 мм) стальной предохраняющей оболочке окружена каналом воздушного охлаждения (1 — 2 мм). Активная зона — внутри бериллиевого отражателя и внешнего слоя тяжелого бетона. Протонный пучок направляется в центр переднего торца мишени. На противоположной стороне установки расположены два 30-см слоя свинца, поглощающих γ -излучение. Радиус установки — около 100 см, ее длина — около 160 см. Более подробное описание установки можно найти в работе [6].

На рис. 2 для топлива с 25% Pu и 75% U и различным

содержанием ^{240}Pu приведены расчетные значения отношения $K_{eff}(\eta)/K_{eff}(0)$ и аналогичные отношения для выхода нейтронов $N(\eta)$ и суммарного тепловыделения $Q(\eta)$. Как видно, уже при $\eta \approx 1\%$ имеет место резкое уменьшение всех трех величин. Энергетическое усиление G снижается при этом приблизительно вдвое и составляет величину, лишь немногим большую единицы.

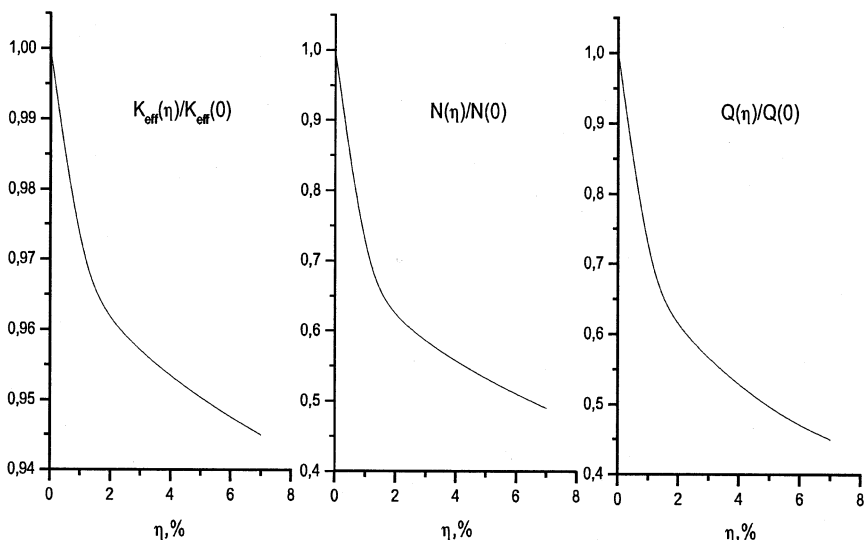


Рис. 2. Зависимость параметров электроядерной установки от примеси изотопа ^{240}Pu

Это происходит в результате быстрого увеличения поглощения низкоэнергетических нейтронов: если в чистом ^{239}Pu на одно де-

ление в активной зоне в среднем приходится 1,1 поглощений, то при $\eta = 1\%$ и 7% их число составляет 1,2 и 1,3.

Таблица 1 показывает, на сколько процентов возрастает коэффициент мультипликации нейтронов

$$\Delta K_{eff}/K_{eff} = [K_{eff}(\alpha) - K_{eff}(25\%)]/K_{eff}(25\%)$$

и как изменяется относительная величина других параметров в зависимости от доли плутония в топливе с различным содержанием изотопа ^{240}Pu . Как и следовало ожидать, выход нейтронов и тепловая мощность системы весьма чувствительны к увеличению доли плутония. Увеличение этой доли с 25 до 27% полностью компенсирует 4%-е снижение K_{eff} , вызванное 2%-й примесью ^{240}Pu . Дальнейшее увеличение доли плутония приводит к резкому возрастанию K_{eff} и может вывести установку в область критичности.

Таблица 1

Зависимость параметров электроядерной системы
от состава топлива МОХ

$\alpha, \%$	$\eta = 2\%$			$\eta = 7\%$		
	26	28	30	26	28	30
$\Delta K_{eff}/K_{eff}$	2,9%	6,1%	9,2%	2,1%	4,6%	7,2%
$N/N(25\%)$	1,2	1,7	2,8	1,2	1,8	2,9
$Q/Q(25\%)$	1,2	1,7	2,9	1,2	1,9	2,9

Относительные значения выхода нейтронов и тепловыделения близки между собой, поскольку основной вклад в эти величины дает деление (в области энергий меньше нескольких МэВ). При этом, как видно из таблицы 2, главную роль играет деление ядер плутония. В среднем на каждое деление в уране приходится около

9 делений в плутонии. В числе делений ядер урана около 20% составляет деление изотопа ^{235}U . Относительные числа делений слабо зависят от примеси ^{240}Pu .

Важной величиной является энергия γ -квантов, от которых в значительной степени зависит радиационная защита установки. В таблице 3 приведена суммарная энергия квантов, рождающихся в (n, γ) -реакциях и γ -излучения, возникающего при релаксации возбужденных ядер, остающихся после неупругого (n, n') -рассеяния и деления. 2%-я примесь ^{240}Pu снижает γ -излучение почти вдвое.

Таблица 2

Относительное число актов деления
изотопов урана и плутония
 $N_f(\eta)/N_f(0)\%$ при $\alpha = 25\%$

η	0%	2%	7%
^{239}Pu	89,2	88,1	86,5
^{240}Pu	0	0,48	1,5
^{238}U	8,9	9,3	9,7
^{235}U	1,8	2,2	2,3

Таблица 3

Энергия γ -излучения [МэВ]
при использовании топлива с
25%-м содержанием плутония
(в расчете на один первичный протон)

η	0%	2%	7%
(n, γ)	906	504	431
$(n, n'), (n, f)$	954	558	401

Авторы благодарны Российскому фонду фундаментальных исследований, при поддержке которого (проект 00-01-00307) выполнена наша работа.

Литература

1. Барашенков В. С. и др. *Применение низкоточных ускорителей ОИЯИ для моделирования экологически безопасной утилизации плутония*. Атомная энергия, 1998, т. 84, с. 272—274.
2. Barashenkov V. S., Puzynin I. V., Sissakian A. N. *A new strategy for electronuclear technology*. JINR News, 1997, No 4, p. 14—16.
3. Barashenkov V. S., Polanski A., Sosnin A. N. *Electronuclear amplifiers of energy with low-energy proton beams*. Kerntechnik, 1998, v. 63, p. 197.
4. Барашенков В. С., Шелаев И. А. *Электроядерные усилители энергии с низкоэнергетическими протонными пучками*. Атомная энергия. 1998, т. 85, с. 409—411.
5. Барашенков В. С. и др. *Физические аспекты электроядерной установки на основе подкритической зоны реактора ИБР-30 и 660-МэВного протонного фазотрона*. ОИЯИ Р2-98-74, Дубна, 1998.
6. Barashenkov V. S., Polanski A., Puzynin I. V. *ADS's based on the 660 MeV proton phasotron of JINR for research on utilization of Plutonium*. Proc. of the Tenth Intern. Conf. on

Emerging Nuclear Energy Systems. Petten (Netherlands), 2000, p. 429-43; JINR E2-2000-131, Dubna, 2000.

7. Barashenkov V. S. *Comp.Phys. Comm. Monte Carlo simulation of ionization and nuclear processes initiated by hadron and ion beams in media.* 2000, v. 126, p. 28 - 31.
8. Абагян Л. П. и др. *Групповые константы для расчета реакторов и защиты.* М., Энергоиздат, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 июня 2001 года.

Барашенков В.С., Филинова В.П.
Зависимость параметров электроядерной системы
от состава топлива МОХ

P2-2001-125

Путем математического моделирования изучается зависимость параметров электроядерной системы с уран-плутониевым топливом МОХ от количества содержащегося в топливе плутония и примеси изотопа ^{240}Pu . В качестве примера рассмотрена экспериментальная установка с тепловой мощностью 10–20 кВт, создаваемая в Дубне на основе 660-МэВ протонного фазотрона. 2 %-я примесь ^{240}Pu снижает коэффициент мультипликации нейтронов с 0,95 до 0,90, а выход нейтронов и величину тепловыделения почти вдвое. Это снижение может быть компенсировано увеличением содержания плутония в топливе МОХ с 25 до 27 %.

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2001

Перевод авторов

Barashenkov V.S., Filinova V.P.
A Dependence of the Electronuclear System Parameters
on the Component Concentration in Fuel MOX

P2-2001-125

A dependence of the parameters of a electronuclear system with U–Pu fuel MOX on the relative share of plutonium and its isotope ^{240}Pu in fuel is investigated by means of mathematical modelling. As an example, we consider an experimental system with a heat power 10–20 kW designed in Dubna on the basis of the 660 MeV proton phasotron. The 2 % admixture of ^{240}Pu decreases the value of the neutron multiplication coefficient from 0.95 down to 0.90, neutron yield and heat power are diminished almost twice. Such a decrease can be compensated by the increase of Plutonium share in MOX from 25 up to 27 %.

The investigation has been performed at the Laboratory of Information Technologies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2001

Редактор М.И.Зарубина. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 27.06.2001
Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. л. 0,52
Тираж 425. Заказ 52747. Цена 52 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
Дубна Московской области