

P2-2002-105

С. А. Бзнуни¹, В. С. Барашенков, В. М. Жамкочян¹,
А. Н. Соснин, А. Полянский², А. Г. Худавердян¹

ДВУХРЕАКТОРНЫЕ ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫЕ СИСТЕМЫ С ЖИДКОКАДМИЕВЫМ ВЕНТИЛЕМ

Направлено в журнал «Атомная энергия»

¹Ереванский государственный университет, Армения

E-mail: bznuni@armenia.com, achudav@server.physdep.r.am

²Институт ядерных проблем им. А. Солтана, Свек, Польша

1. Введение

По оценкам различных авторов [1,2] подкритические электроядерные системы, управляемые сильноточными ускорителями, являются весьма перспективным направлением широкомасштабного развития ядерной энергетики, обеспечивающим ее безопасность – невозможность неконтролируемой реакции деления, предотвращение распространения технологий и материалов, пригодных для создания ядерного оружия, эффективную трансмутацию опасных радиотоксичных отходов и, как результат, формирование общественного доверия к ядерной энергетике.

Однако при этом следует принимать во внимание, что [3,4]: высокая стоимость ускорителя требует сочетания в одной установке трансмутации как актиноидов (предпочтительно в жестком спектре нейтронов), так и долгоживущих продуктов деления, нарабатываемых несколькими энергетическими реакторами типа PWR (обычно сечение радиационного захвата нейтронов такими изотопами велико в резонансном эпитепловом спектре нейтронов). Поэтому система должна одновременно обеспечивать режимы работы и в жестком, и в тепловом спектрах. При этом мощность blankets должна составлять несколько ГВт и потоки нейтронов должны быть на уровне 10^{14} - 10^{15} см⁻²с⁻¹, а ток ускорителя не превышать 5-10мА, что весьма трудно обеспечить с помощью одnoreакторных электроядерных систем ввиду малой удельной мощности, больших токов пучков протонов (30-100мА) и фиксированной жесткости спектра нейтронов [3-5].

Значительно большие возможности предоставляют двухреакторные подкритические системы, состоящие из реактора-бустера на быстрых нейтронах, работающего в жестком нейтронном спектре, и реактора на тепловых нейтронах, производящего основную часть энергии. Такие электроядерные системы позволяют в принципе снизить ток протонов на порядок и обеспечить при этом необходимый уровень мощности и потока нейтронов, а наличие и быстрой, и тепловой зон дают возможность эффективно трансмутировать всю палитру ядерных отходов.

2. Вопросы эффективности и безопасности двухреакторных электроядерных систем

Эффективность двухреакторных систем существенно зависит от двух параметров:

- 1) уровня утечки, который характеризуется коэффициентом связи k_{21} - вероятностью того, что нейтрон из бустера создаст нейтрон деления следующего поколения в тепловой зоне, т.е. от k_{∞} бустера, поскольку $k_{21} = 1 - k_{\text{эфф}}/k_{\infty}$;
- 2) уровня подавления обратной нейтронной связи, которая определяется коэффициентом связи k_{12} - вероятностью того, что нейтрон из тепловой зоны создаст нейтрон деления следующего поколения в бустере.

Как видно из соотношения

$$A = \frac{\Delta k + k_{12} + \sqrt{k_{12}k_{21}}}{\Delta k + 2\sqrt{k_{12}k_{21}}},$$

где A — трансмутационная эффективность системы, которая определяется как соотношение суммарной мощности источника делительных нейтронов в двухреакторной системе к мощности источника делительных нейтронов в однореакторной системе — $A = S/S^{(1)}$, $S^{(1)} = S_0^{(1)}/\Delta_i$, где $S_0^{(1)}$ мощность источника нейтронов от ускорителя, при условии равенства подкритичности и мощности ускорителя в том и другом случае, а $\Delta_i \equiv 1 - k_{ii}$, наибольшая эффективность достигается при полном отключении обратной нейтронной связи, т.е. при $k_{12} = 0$, и максимальном значении k_{∞} [6].

В настоящее время рассматриваются три основных конструктивных варианта:

- 1) Пороговые каскадные системы [6] с двумя активными зонами, разделенными промежуточным слоем вольфрама или молибдена (в некоторых конфигурациях в качестве промежуточного слоя рассматривается замедлитель с тяжелой водой), в бустере которого в качестве материала используются пороговые делящиеся вещества типа ^{237}Np , ^{240}Pu , ^{234}U и т.п., а в основном тепловом реакторе — обычное (не пороговое) делящееся вещество ($^{235,233}\text{U}$, $^{241,239}\text{Pu}$).

В таких системах можно достичь значительного различия коэффициентов нейтронной связи между двумя активными зонами и создать тем самым даухреакторные системы с односторонней связью,

изменяя толщину промежуточного слоя, используя его большую замедляющую способность в области высоких энергий нейтронов, незначительную замедляющую способность в области низких энергий и относительно малое сечение захвата нейтронов,.

Однако применение трансмутационных электроядерных систем, включающих зоны из ^{237}Np с большими удельными мощностями, осложнено ядерными превращениями, нарушающими требование пороговости топливного материала и скачком $k_{эфф}$ от 0,95 до 1,01 при потере слоя замедлителя между бустером и основным тепловым blanketом [7]. К этому следует добавить, что верхний предел утечки нейтронов из нептуниевой мишени примерно вдвое меньше, чем из урановой, поскольку $k_{\infty} \cong 1,2$ для зоны с $^{237}\text{NpO}_2$, в то время как для урановой зоны на уровне 1,5 [8]. Кроме того, мировые резервы ^{237}Np весьма ограничены.

2) Жидкотопливный бустер [9], в солевой компоненте которого растворены делящиеся ядра с большими концентрациями. Чтобы обеспечить высокую вероятность k_{21} , используются поглотители резонансных и тепловых нейтронов - GdF_4 , SmF_4 , сечения поглощения нейтронов которыми в данной области очень велики ($\sigma_{n,\gamma} \sim 10^4$ б) и быстро спадают с ростом энергии нейтронов. Таким образом, нейтроны из бустера фактически не поглощаются этими ядрами, а нейтроны, попадающие из тепловой зоны в быструю сильно поглощаются, тем самым обеспечивая подавленную обратную нейтронную связь.

Однако надо заметить, что количество и делящихся ядер и поглотителей (соответственно коэффициенты k_{21} и k_{21}) ограничено растворимостью этих веществ в расплавленных солях.

3) Бустер на обогащенном уране [3, 5, 10], который обеспечивает максимальную утечку нейтронов в тепловую зону (k_{21}), по сравнению с остальными системами, а подавление обратной нейтронной связи осуществляется твердым слоем кадмия, благодаря чему эти системы обеспечивают наивысшие выходные характеристики. Недостатком этой системы является скачок $k_{эфф}$ при гипотетическом обрушении термомеханического изолирующего слоя с кадмием по причине резкого перепада давлений в бустере и в тепловой зоне при штатных ситуациях.

Для решения этой проблемы в настоящей работе предлагается сохранять кадмий не в твердом состоянии, а в виде жидкого слоя внутри изолирующей зоны. В этом случае при разрушении термомеханического изолирующего слоя жидкий кадмий вливается в

систему, в результате чего она становится еще более подкритичной. Надо заметить, что температура плавления кадмия $t_{пл}=320,9^{\circ}\text{C}$, это значение находится на уровне или ниже рабочих температур в двухреакторных системах, что позволяет поддерживать кадмий в жидком состоянии в различных режимах эксплуатации системы за счет несложных технических решений. Температура кипения кадмия $t_{кип}=767^{\circ}\text{C}$ превышает рабочие температуры в системе.

3. Метод расчета

Параметры системы рассчитывались методом Монте-Карло с помощью программ CASCAD [11] с библиотеками сечений [12,13] и MCNP4B [14] с библиотекой DLC - 189.

4. Результаты моделирования

На рис. 1. показано, как изменяется $k_{эфф}$ при разрушении вентиля из 3-см жидкого кадмиевого слоя для двухреакторной системы на основе жидкосолевого реактора MSBR-1000 при гомогенном растворении кадмия в бустерной зоне.

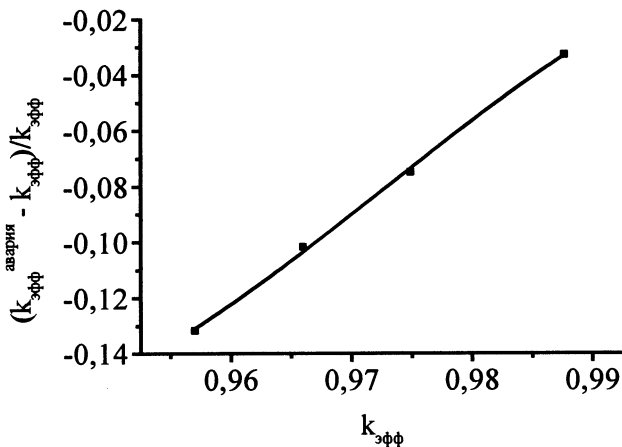


Рис. 1. Изменения $k_{эфф}$ при разрушении вентиля в зависимости от $k_{эфф}$ при гомогенном растворении кадмия в бустере для двухреакторной системы на основе жидкосолевого реактора MSBR-1000

Как видно из рисунка, уже при 3-см слое жидкого кадмия система не только не разгоняется, но и становится более подкритичной, что объясняется тем, что гомогенизация приводит к повышению эффективности использования поглотителя. Надо заметить, что спад $k_{эфф}$ в результате аварии сокращается при росте $k_{эфф}$, что объясняется тем, что с ростом $k_{эфф}$ отношение числа делений к числу поглощений в системе при «аварии» растет более быстрее, чем при «штатном» состоянии (рис.2).

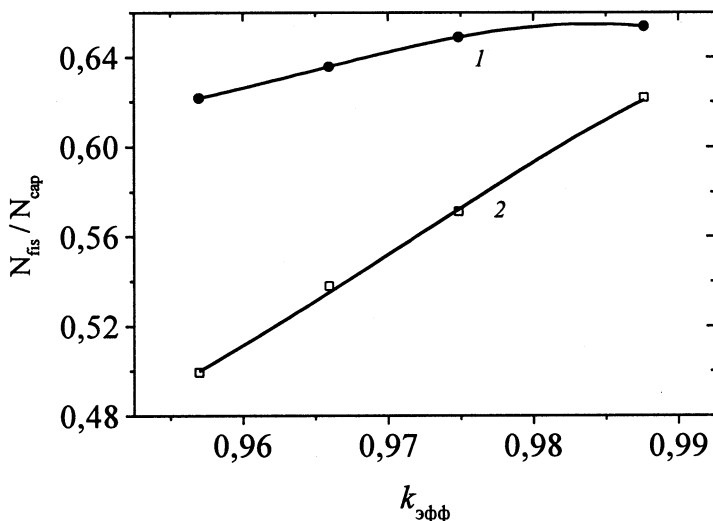


Рис.2. Изменение соотношения числа делений к числу поглощений в зависимости от $k_{эфф}$ при гомогенном растворении кадмия в бустере (2) и при «штатном» функционировании (1) для двухреакторной системы на основе жидкосолевого реактора MSBR-1000

Рис.3 иллюстрирует изменения $k_{эфф}$ при разрушении вентиля из жидкого кадмия для двухреакторной системы на основе жидкосолевого реактора MSBR-1000 в случае, если кадмий не растворяется гомогенно, а выпадает в осадок или скапливается изолированно в ограниченном объеме.

В этом случае для поддержания системы в подкритическом состоянии необходимое количество эквивалентно 7-см слою кадмия. Причина этого эффекта заключается в том, что в этом случае в верхней

части бустера, которая остается свободной от кадмия, идет очень интенсивный процесс размножения тепловых нейтронов из тепловой зоны, которые при разрушении вентиля легко попадают в бустерную зону. В этом случае тоже разница между $k_{эфф}$ до и после аварии сокращается при росте $k_{эфф}$, более того, уже при $k_{эфф} = 0,98764$, $k_{эфф}$ при аварии превышает $k_{эфф}$ при нормальном состоянии, но система остается подкритичной.

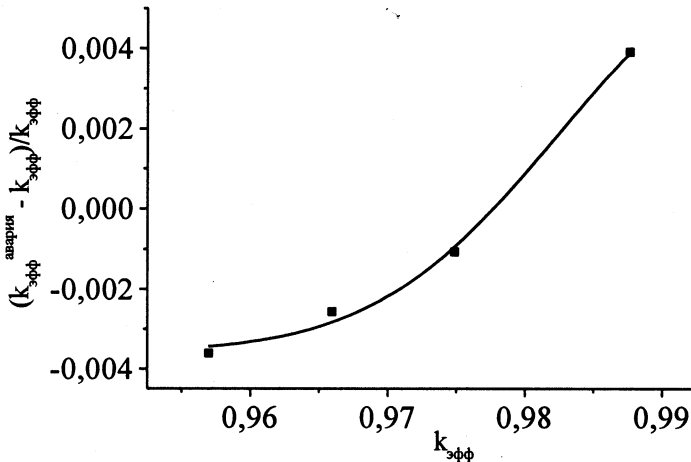


Рис. 3. Изменения $k_{эфф}$ при разрушении кадмиевого вентиля в зависимости от $k_{эфф}$ при выпадении кадмия в осадок в бустерной зоне для системы на основе жидкосолевого реактора MSBR-1000

Это обусловлена тем, что с ростом $k_{эфф}$ отношение числа делений к числу поглощений в системе при «аварии» растет быстрее, чем при «штатном» состоянии (рис. 4.).

На рис. 5 показано изменение $k_{эфф}$ при разрушении вентиля из 3-см жидкого кадмия для двухреакторной системы на основе ВВЭР-1000 при гомогенном растворении кадмия в тепловой зоне.

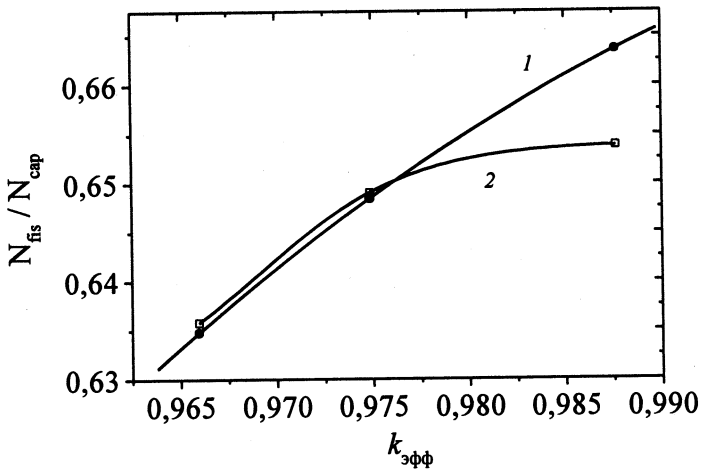


Рис.4. Изменение отношения числа делений к числу поглощений в зависимости от $k_{эфф}$ падения кадмия в осадок в бустере (1) и при «штатном» функционировании (2) для двухреакторной системы на основе жидкосолевого реактора MSBR-1000.

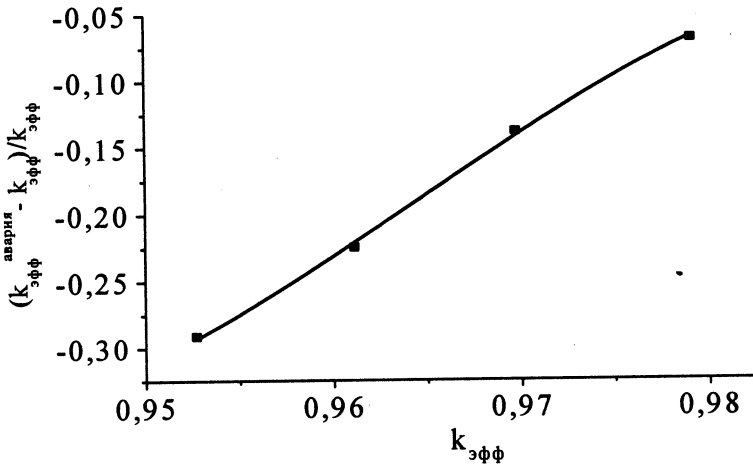


Рис. 5. Изменения $k_{эфф}$ при разрушении вентиля в зависимости от $k_{эфф}$ при гомогенном растворении кадмия в тепловой зоне для двухреакторной системы на основе ВВЭР-1000

В этом случае система тоже становится более подкритичной, но уровень подкритичности примерно два раза больше, чем для случая вливания кадмия в бустерную зону, что обусловлена тем, что у кадмия очень высокое сечение поглощения тепловых нейтронов и вливание его в тепловую зону приводит к резкому спаду $k_{эфф}$ тепловой зоны и, как следствие, системы в целом.

На рис.6 показано изменение $k_{эфф}$ при разрушении вентиля из жидкого кадмия для двухреакторной системы на основе ВВЭР-1000 в случае, если кадмий не растворяется гомогенно, а выпадает в осадок в тепловой зоне.

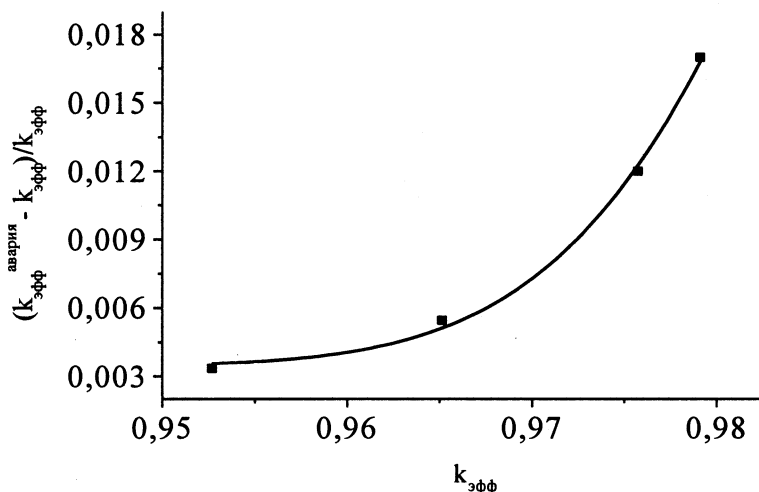


Рис. 6. Изменения $k_{эфф}$ при разрушении вентиля в зависимости от $k_{эфф}$ при выпадения кадмия в осадок в бустере для двухреакторной системы на основе жидкосолевого реактора MSBR-1000

В этом случае для поддержания системы в подкритическом состоянии необходимое количество кадмия эквивалентно 7-см слою, что связано с тем, что в этом случае в верхней части тепловой зоны, которая остается свободной от кадмия, продолжается интенсивный процесс размножения тепловых нейтронов, которые при разрушении вентиля легко попадают в бустерную зону. При этом различие значений $k_{эфф}$ до и после аварии опять-таки постепенно сокращается при росте

$k_{эфф}$, превышая $k_{эфф}$ при нормальном режиме, однако система все время остается подкритичной.

Это обусловлено тем, что с ростом $k_{эфф}$ очень интенсивно растет число нейтронов в системе благодаря беспрепятственному проникновению тепловых нейтронов в бустер из верхней части тепловой зоны, свободной от кадмия, что вызывает интенсивный рост числа делений.

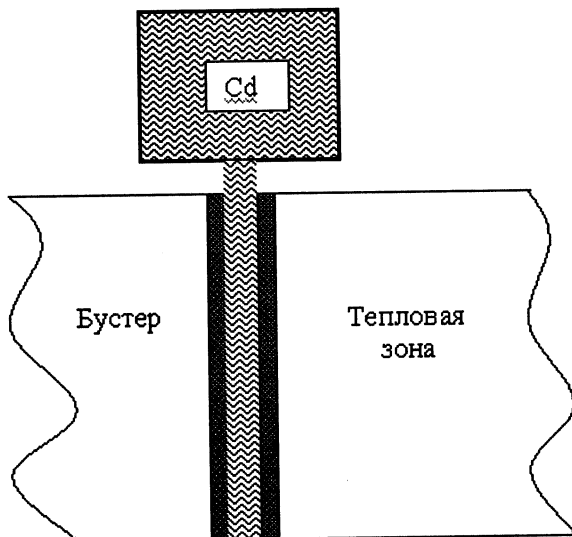


Рис. 7. Один из вариантов пассивной защиты при разрушении кадмиевого вентиля

Вместе с тем надо заметить, что прямое присутствие такого количества кадмия в системе серьезным образом ухудшает нейтронный баланс. В качестве одного из возможных решений этой проблемы предлагается над активными зонами системы помещать бак с необходимым количеством жидкого кадмия (рис. 7). При нормальном функционировании в системе присутствует только слой кадмия толщиной 3 см. При аварии под воздействием силы тяжести жидкий кадмий вливается в систему, тем самым пассивным способом ликвидируя опасность разгона реактора.

5. Заключение

Мы показали, что:

1. Наиболее эффективными с точки зрения обеспечения высоких выходных характеристик и безопасных режимов функционирования являются двухреакторные системы с бустером на обогащенном уране и жидкокадмиевым вентилем;
2. Опасность разгона двухреакторных электроядерных систем с бустером на обогащенном уране в результате несрабатывания кадмиевого вентиля из-за разрушения тепломеханической изолирующей зоны с твердым кадмиевым слоем и, следовательно, надкритичности исключается, если в системе кадмий поддерживается не в твердом состоянии, а в виде жидкого слоя внутри изолирующей зоны. Таким образом, двухреакторные электроядерные системы с бустером на обогащенном уране и с жидкокадмиевым вентилем обладают свойством гарантированной падкритичности.

Литература

- [1] *Proc. of the International Conference AccApp/ADTTA'01, November 12-15, Reno, Nevada, 2001.*
- [2]. *Proc. of the 10 -rd International Conference on Emerging Nuclear Systems, September 28, 2000, Petten.*
- [3] **Бзнуни С.А., Жамкочян В.М., Худавердян А.Г. и др.** *Монтекарловское моделирование параметров двухреакторных электроядерных систем.* Препринт ОИЯИ Р2-2002-27, Дубна 2002.
- [4]. **Бергельсон Б.Р., Никитин А.А., Старостин В.Т. и др.** *Подкритическая установка (мишень-бланкет) для трансмутации актиноидов.* Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 5, с. 341.
- [5] **Бзнуни С.А., Барашенков В.С., Жамкочян В.М. и др.** *Монтекарловское моделирование параметров подкритического каскадного реактора, основанного на жидкосольевой и жидкометаллической технологии.* Препринт ОИЯИ Р2-2001-124, Дубна, 2001
- [6]. **Колесов В.Ф., Гужовский Б.Я.** *Повышение эффективности электроядерного трансмутационного устройства за счет многосекционной структуры бланкета.* Атомная энергия, 1994, том 76, вып. 1, с. 71-77.
- [7]. **Ado Yu.M., Gorbatkov D.V., Kryuchkov V.P., Lebedev V.N.** *Some Advantages and Disadvantages of Electronuclear Reactor Based on 2-*

Section Blanket. – The Eight Int. Conf. on Emerging Nucl. Systems, ICENES'96, Obninsk, June 24-28, 1996, v.2, p. 587-590.

- [8]. Селиверстов В.В. Умножение нейтронов внешнего источника в каскадных подкритических системах с односторонней нейтронной связью. Атомная энергия, 1996, том 81, вып. 5, с. 378-390.
- [9]. Алексеев П.Н., Игнатьев В.В., Коляскин О.Е. и др. Каскадный подкритический реактор повышенной безопасности. – Там же, 1995, т.79, вып. 5, с. 327-337.
- [10]. Bznuni S.A., Khudaverdyan A.H., Zhamkochyan V.M. e.a. Monte-Carlo Modeling of Bireactor Electronuclear System. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2002, v. 2, N 1-2, p. 21-29.
- [11]. Barashenkov V.S. Monte-Carlo simulation of ionization and nuclear processes initiated by hadron and ion beams in media. - Comp. Phys. Comm., 2000, v. 126, p. 28–31.
- [12]. Абагян Л. П., Базазянц Н.О., Николаев М.Н., Цибуля А.М. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. - М.: Атомиздат, 1981.
- [13]. Barashenkov V.S., Gudowski W, Polanski A. Integral high-energy nucleon-nucleus cross-sections for mathematical experiments with electronuclear facilities. – In: Proc. of the 3 -rd Intern. Conf. on ADTT'A, June 7-11,1999, Praha.
- [14]. Briesmeister Yu. A. General Monte-Carlo N-Particle transport Code. Report LA- 12625-M, Los Alamos, March 1997.

Получено 30 апреля 2002 г.

Бзнути С. А. и др.

P2-2002-105

Двухреакторные электроядерные системы с жидкокадмиевым вентилем

Обсуждается три основных варианта двухреакторных электроядерных систем. Показано, что наиболее эффективными с точки зрения обеспечения высоких выходных характеристик и безопасных режимов функционирования являются двухреакторные системы с бустером на обогащенном уране и жидкокадмиевым вентилем. Посредством монте-карловского моделирования показано, что в процессе работы установки могут быть созданы такие условия, при которых разрушение промежуточного вентильного слоя делает такие системы надкритическими ($k_{эфф} > 1$). Этого можно избежать с помощью специальной конструкции вентиля с жидким кадмием. По сравнению с другими ядерными установками (критические реакторы, однореакторные электроядерные системы) каскадные электроядерные системы обладают существенными преимуществами, позволяя снизить ток протонов примерно на порядок и обеспечить при этом необходимый уровень мощности и потока нейтронов, а наличие и быстрой, и тепловой зон дает возможность эффективно выжечь не только трансураниевые элементы, но и трансмутировать продукты деления — цезий, йод, технеций, обладающие повышенной способностью проникать в биосферу.

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Bznuni S. A. et al.

P2-2002-105

Bireactor Electronuclear Systems with Liquid Cadmium Valve

Three main types of bireactor electronuclear systems are discussed. From the point of view of assuring high level of functional characteristics and safety bireactor electronuclear systems with booster using enriched uranium (20 %) and with a liquid cadmium valve appears to be the most effective. It is shown by means of Monte-Carlo modeling that such operation conditions can be achieved which lead to the destruction of the intermediate cadmium layer making the systems supercritical ($k_{eff} > 1$). One can avoid the problem by using a special design of the liquid cadmium valve. In comparison with other nuclear systems (critical reactors, one-reactor electronuclear systems) cascade electronuclear systems have essential advantages allowing the decrease of the proton beam current by one order of magnitude and providing at same time the necessary level of power generation and neutron flux. Availability of both the thermal and fast cones allows one to transmute not only transuranics but also the fission products — cesium, iodine, technetium, which show increased capability to penetrate the biosphere.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

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

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 30.05.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,81. Тираж 430 экз. Заказ № 53308.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.