

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Дубна**

P2-2000-137

**С.А.Бзнути<sup>1</sup>, В.С.Барашенков, В.М.Жамкочан<sup>1</sup>,  
А.Полянски<sup>2</sup>, А.Н.Соснин, А.Г.Худавердян<sup>1</sup>**

**МОНТЕ-КАРЛОВСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ  
В КАСКАДНОМ ПОДКРИТИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ**

Направлено в журнал «Атомная энергия»

<sup>1</sup>Ереванский государственный университет, Армения  
E-mail: achudav@server.physdep.r.am

<sup>2</sup>Институт ядерных проблем, Польша

## 1. Введение

Дальнейшее развитие ядерной энергетики зависит от решения двух основных задач: повышения уровня безопасности и разработки эффективных методов трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов. Интересные возможности в этом направлении открывают управляемые ускорителями подкритические электроядерные системы. Однако все они требуют создания ускорителей с токами 20 - 30 мА, что является весьма сложной задачей. Требуемую интенсивность пучка ускоренных частиц можно значительно снизить, если использовать "каскадные" системы из нескольких связанных между собою подкритических реакторов. Далее в качестве модельного примера мы рассмотрим электроядерную систему, состоящую из двух реакторов - на быстрых и тепловых нейтронах, управляемую протонным ускорителем с энергией  $E = 1$  ГэВ. Предварительные оценки возможностей такой системы в однокрупном приближении рассмотрены в работе [1].

## 2. Основные характеристики системы

Принципиальная схема подкритической системы показана на рис.1. Система состоит из реактора-бустера на быстрых нейтронах, работающего в жестком нейтронном спектре, и из реактора на тепловых нейтронах, производящего основную часть энергии, используемого в качестве трансмутатора (максимальный поток нейтронов в тепловой зоне  $\Phi^{\max} = 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ). Конструктивно этот реактор является внешним по отношению к бустерному и отделен от него кадмиевым экраном-вентилем для исключения проникновения тепловых нейтронов в зону бустера. Протонный пучок бомбардирует расположенную в центре бустера свинцово-висмутую мишень, являющуюся источником нейтронов, которые рождаются в высокоэнергетических реакциях расщепления, испарения и деления образующихся при этом высоковозбужденных ядер.

Основные параметры моделируемой системы приведены в таблице 1. Облучаемая протонами мишень из свинцово-висмутовой эвтектики (44,5-55,5 масс.%) [2,3] генерирует нейтроны в окружающую ее активную зону бустера, состоящую из гексагональных ТВС БН-350 с длиной, равной ТВС ВВЭР-1000 [4,5]. Диаметры оболочек ТВЭЛов сохранены такими же, как в БН-350. Это позволяет существенно

увеличить эффективную площадь "излучения" нейтронов из бустера и упрощает конструкцию системы, т.к. высота обеих зон (тепловой и быстрой) оказывается одинаковой.

В качестве топлива предполагается двуокись урана, конструкционный материал - нержавеющая сталь. Теплоъем осуществляется с помощью жидкой эвтектики свинец-висмут (50-50 масс.%).

Работая в подкритическом режиме, бустерный блок существенно увеличивает количество поступающих из мишени быстрых нейтронов, повышая тем самым их поток внутри подкритического реактора на тепловых нейтронах, аналогичного по своей конструкции реактору ВВЭР-1000 [4, 5].

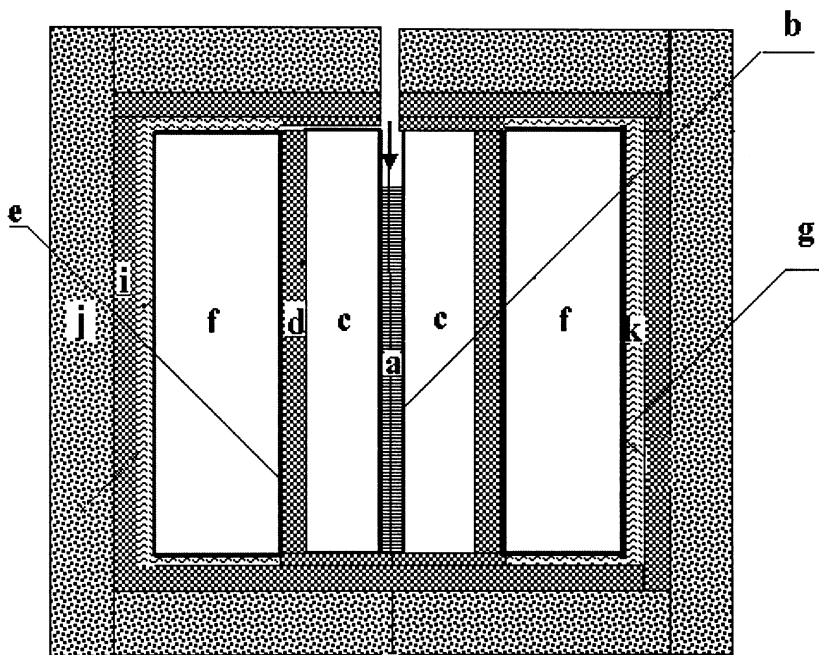


Рис. 1. Схема подкритической электроядерной системы из двух связанных реакторов: *a* - мишень, *b* - защитная оболочка, *c* - активная зона быстрого бустера, *d* - изолирующая зона, *e* - кадмиевый экран, *f* - активная зона теплового реактора, *g* - оболочка из нержавеющей стали, *к* - отражатель, *i* - корпус системы, *j* - бетон

Таблица 1  
Параметры моделируемой системы

Радиус активной зоны бустера	57 см
Радиус тепловой зоны	158 см
Высота активной зоны реактора	350 см
Радиус мишени	8,5 см
Высота мишени	320 см
Толщина бетона	500 см
Максимальный нейтронный поток в тепловой зоне	$10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

Поскольку режимы работы блоков  $c$  и  $f$  существенно различаются по давлению и температуре, предусмотрена промежуточная область  $d$ , равная по толщине (19 см) корпусу высокого давления ВВЭР-1000 [4,5]. Слой воды толщиной 20 см использован в качестве отражателя. На внешней стороне области  $d$  расположен кадмиевый слой-вентиль толщиной 3 см.

Для предотвращения проникновения в активную зону бустера радиоактивных ядер-фрагментов, образующихся при взаимодействии первичного протонного пучка с мишенью, предусмотрена стальная прослойка  $b$  толщиной 1 см.

### 3. Метод расчета

Для расчета параметров системы использовалась программа CASCAD [6,7] с библиотекой адрон-ядерных сечений [8], описывающая транспорт частиц в веществе на основе каскадно-испарительной модели адрон-ядерных взаимодействий (с учетом высокоэнергетического деления) [9,10]. Перенос нейтронов низкой энергии ( $E < 10,5$  МэВ) также моделировался с помощью программы CASCAD, дополненной программными модулями, позволяющими определять относительные скорости нейтронов и ядер среды в области термализации нейтронов (собственные скорости ядер моделировались в соответствии со спектром Максвелла - Больцмана) и соответствующие им сечения взаимодействия нейтронов с ядрами среды [11]. Учет собственных скоростей теплового движения ядер среды, а также относительных скоростей при определении сечений взаимодействия нейтронов в тепловой области приводит к характерному спектру

нейтронов (см. рис. 6). В расчете использовались библиотеки нейтронных сечений [12-13]. В каждой из зон (см. рис. 1) среда гомогенизировалась с учетом находящихся в данной зоне горючего, теплоносителя и конструктивных элементов.

Для проверки точности расчета коэффициента размножения нейтронов  $k_{эфф}$  использовалась программа MCNP4B [14] с библиотекой нейтронных сечений DLC-189.

#### 4. Результаты моделирования

На рис.2 и 3 приведены кривые, описывающие электрическую мощность системы и ток ускорителя в зависимости от  $k_{эфф}$ . Мощность системы определялась из условия, что величина потока нейтронов в тепловой зоне ограничена значением  $\Phi^f(r,z) \leq 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , что вполне достаточно для трансмутации радиоактивных отходов.

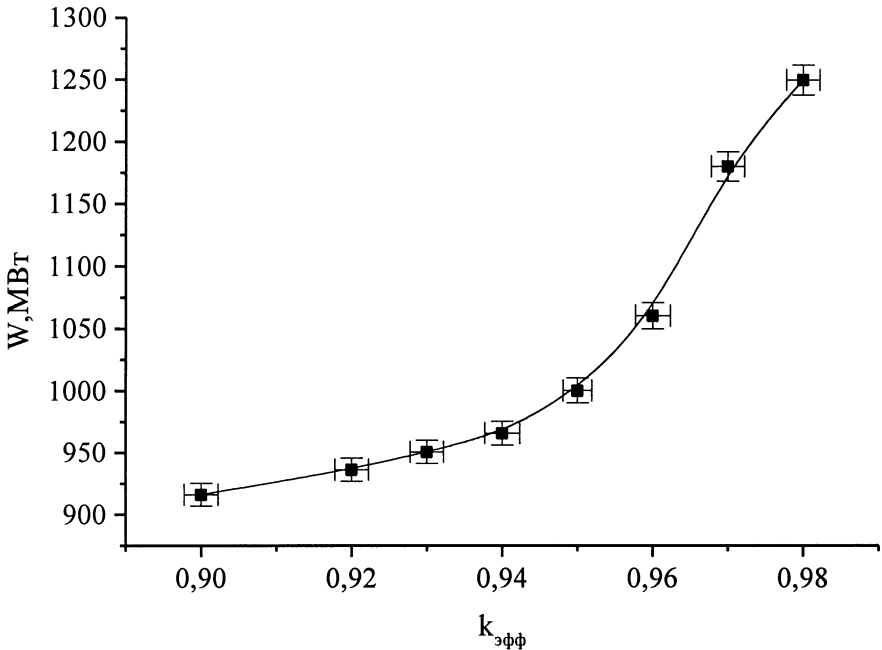


Рис. 2. Изменение электрической мощности системы в зависимости от коэффициента мультипликации  $k_{эфф}$

Предполагалось, что коэффициент преобразования тепловой энергии в электрическую равен 0,33. Энергия протонного пучка ускорителя  $E = 1$  ГэВ.

Из рисунков видно, что рассматриваемая система может производить энергию в безопасном режиме ( $k_{эфф} = 0,94 \div 0,98$ ) и в то же время трансмутировать ядерные отходы (максимальный поток нейтронов в тепловой зоне  $\Phi^{max}(r,z) = 10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , в быстрой зоне -  $\Phi^{max}(r,z) = 2,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) при технически доступном сегодня уровне ускорительной техники. В частности, при  $k_{эфф} = 0,95$  максимальная электрическая мощность достигает  $W = 960$  МВт, а необходимый ток в пучке протонов  $I = 11,2$  мА. При  $k_{эфф} = 0,98$  мощность системы соответственно равна  $W^c = 1200$  МВт и ток всего лишь  $I = 5,3$  мА. По оценкам других авторов (см., например, [15]) следует, что такие параметры технически достижимы на современном уровне развития ускорительной техники.

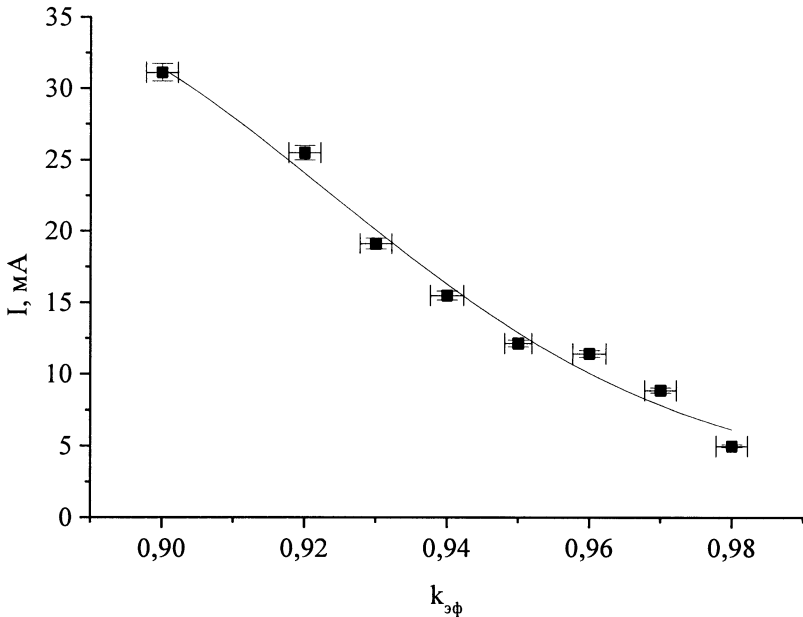


Рис. 3. Ток ускорителя, обеспечивающий поток нейтронов  $10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в зависимости от коэффициента размножения  $k_{эфф}$

Заметим, что основные результаты, полученные в работе [1] в однокрупном приближении, несильно отличаются от результатов, полученных с помощью программ CASCAD и MCNP4B. Так, в работе [1] при  $k_{эфф}=0,98$ , ток ускорителя  $I=0,57$  мА с учетом того, что максимальный поток нейтронов в тепловой зоне  $3,2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, а в многокрупном расчете - 0,8 мА. Это можно объяснить тем, что в работе [1] пренебрегалось отражением и поглощением быстрых нейтронов в зонах *d* и *e* и в качестве мишени использовался обедненный уран.

На рис. 4 и 5 представлена зависимость коэффициента усиления энергии  $G$  в зависимости от энергии пучка протонов при  $k_{эфф}=0,951 \pm 0,002$  и от  $k_{эфф}$ .

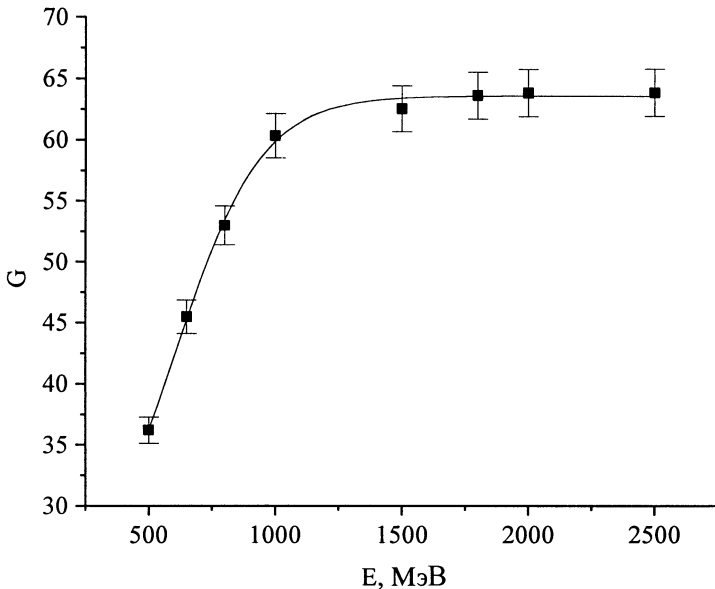


Рис. 4. Коэффициент усиления энергии в зависимости от энергии пучка протонов при  $k_{эфф}=0,951 \pm 0,002$

Коэффициент усиления  $G$  определяется как отношение мощности системы к мощности пучка протонов.

Уменьшение коэффициента усиления энергии при переходе к области низких энергий объясняется резким возрастанием ионизационных потерь первичных протонов.

Как видно из рис. 4, величина  $G$  практически выходит на плато при энергии протонов 1-1,5 ГэВ. В частности, при энергии  $E=1$  ГэВ и  $k_{эфф}=0,98$  - коэффициент усиления мощности  $G=215$ .

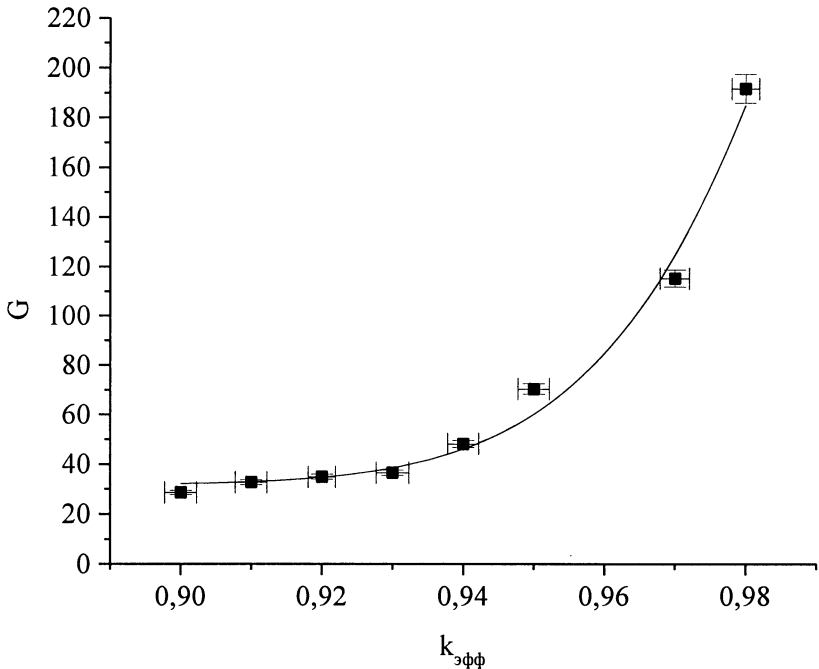


Рис. 5. Коэффициент усиления энергии в зависимости от  $k_{эфф}$

Если "коммерческую мощность" реактора определить как

$$P_{com} = P_{ADS} - P_{acc},$$

где  $P_{ADS}$  - электрическая мощность электроядерной системы,  $P_{acc}$  - электрическая мощность, затрачиваемая на работу ускорителя, и принять во внимание, что непроизводительные потери мощности в ускорителе составляют 2/3 от потребляемой мощности, то при энергии



ускорения 1 ГэВ и  $k_{эфф}=0,98$  мощность ускорителя  $P_{acc}=15,6$  МВт, а коммерческая мощность реактора  $P_{com}=1184,4$  МВт.

Заметим, что сравнительный анализ результатов расчета  $k_{эфф}$  с использованием программ CASCAD и MCNP4b при том же обогащении показывает, что они отличаются между собой менее чем на 0,1%.

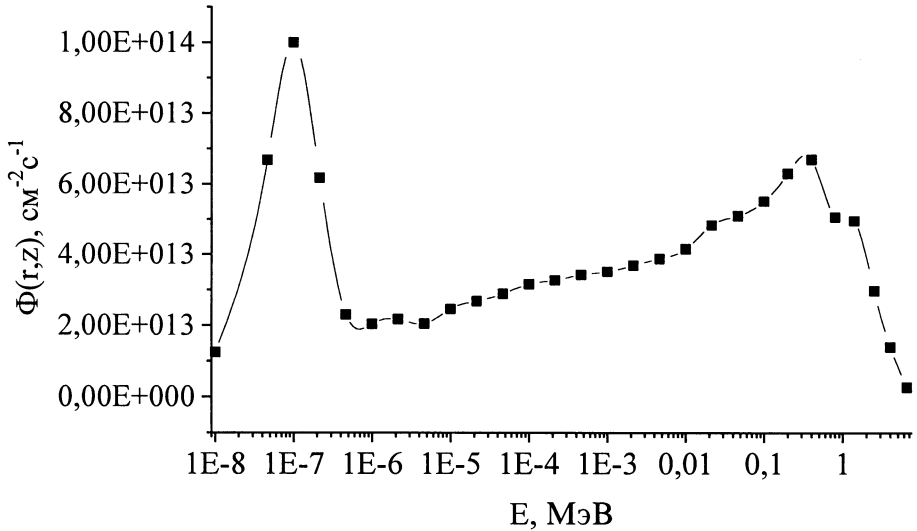


Рис. 6. Энергетический спектр нейтронов в тепловой зоне при  $k_{эфф}=0,98119\pm 0,00221$  и токе  $I=5,3$  мА

Как видно из рисунков 6 и 7, если максимальная плотность потока нейтронов в тепловой зоне равна  $\Phi^{max}(r,z)=10^{14}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, то плотность потока нейтронов в быстрой зоне соответственно равна  $2,25\cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

Форма спектра нейтронов в быстрой зоне близка к спектру нейтронов деления. Спектр нейтронов в тепловой зоне представляет собой типичный спектр замедления. Наличие в рассматриваемом потоке нейтронов в широком диапазоне энергии, а также значительная интенсивность потока нейтронов позволяют эффективно трансмутировать ядерные отходы [16-17].

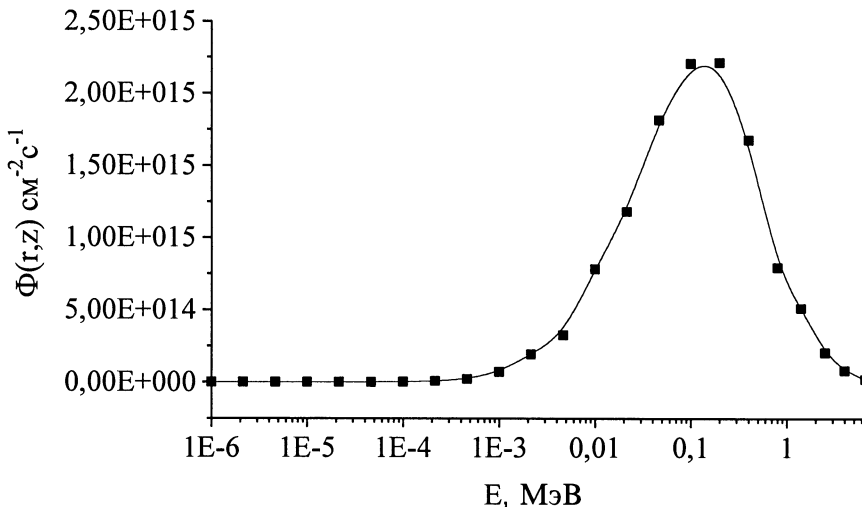


Рис. 7. Энергетический спектр нейтронов в быстрой зоне при  $k_{эфф}=0,98119\pm 0,00221$  и токе  $I=5,3$  мА

Один из авторов (Б.С.А.) благодарит дирекцию ЛВТА ОИЯИ в лице профессора И.В. Пузынина, где выполнена данная работа, и ее сотрудников Э.А. Айряна и А.В. Федорова за помощь в работе.

## Литература

- [1] Бзнуни С.А., Жамкочян В.М., Худавердян А.Г. *Параметры двухреакторных систем, управляемых ускорителями* Атомная энергия, 2000, том 88, вып. 4, с. 316.
- [2] Gromov B.F., Orlov Ju. I., Gylevskiy V.A. *Physics - chemical Properties of Pb - Bi Eutectic, Used as Coolant for Liquid Metall Target*. Proc. of the Second International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, June 3-7, 1996, Kalmar, Sweden.

- [3] **Klimov N.N., Stepanov V.S., Kutanov V.A., Pantiushin A.B.** *Development of the Target Circuit with Lead-Bismuth Coolant for Conditions the LANSCE Accelerator* Proc. of the 3 -rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, June 7-11,1999, Praha, Czech Republic.
- [4] **Дементьев Б.А.** *Ядерные энергетические реакторы.* М.: Энергоатомиздат. 1996.
- [5] **Овчиноков Ф. Я. и др.** *Эксплуатационные режимы водородных энергетических ядерных реакторов.* М.: Атомиздат, 1979.
- [6] **Барашенков В.С. и др.** Препринт ОИЯИ P2-85-173, 1985.
- [7] **Barashenkov V.S.** *Comp. Phys. Comm.*, 2000, v. 126, p 28.
- [8] **Barashenkov V.S., Gudowski W, Polanski A.** *Integral High-Energy Nucleon-Nucleus Cross-Sections for Mathematical Experiments with Electromuclear Facilities.* Proc. of the 3 -rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, June 7-11,1999, Praha, Czech Republic.
- [9] **Barashenkov V.S., Kostenko B.F., Zadorogny A.M.** *Nucl Phys.* 1980, v. A338, p. 413.
- [10] **Barashenkov V.S., Toneev V.** *Interaction of High Energy Particles and Nuclei.* Atomizdat, Moscow, 1972.
- [11] **Барашенков В.С., Левчук Л. Г., Соснин А.Н., Шмаков С.Ю.** *Характеристики электроядерных мишеней, содержащих воду.* Атомная энергия, 1994, т.77, вып.6, с. 419-424.
- [12]. **Абагян Л. П. и др.** *Групповые константы для расчета ядерных реакторов.* М.: Атомиздат, 1974.
- [13] **Хохлов В. Ф., Савоськин М. Н.** *Вопросы атомной науки и техники.* Сер. ядерные константы. 1972, вып. 8, ч. 3, с. 328.
- [14] **Briesmeister Yu.** Report LA-12625-M, Los-Alamos, March 1997.

- [15]. **H. Klein.** *Spallation neutron sources.* Proc. of the 1994 Intern. Linac. Conf., 21-26 Aug., 1994. Tshukuba, Japan, v. 1, p. 322.
- [16] **Bowman C.** *Sustained Nuclear Energy without Weapons or Reprocessing Using Accelerator-Driven Systems.* Proc. of the 3 -rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, June 7-11, 1999, Praha, Czech Republic
- [17] **Garcia-Sanz J., Embid M., Fernandez R., Gonzalez E.** *Isotopic Composition Simulation of the Sequence of Discharges a thorium TRU's, Lead Cooled, ADS.* Proc. of the 3 -rd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, June 7-11, 1999, Praha, Czech Republic.

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 июня 2000 года.

Бзнуни С.А. и др.

P2-2000-137

Монте-карловское моделирование электроядерных процессов  
в каскадном подкритическом реакторе

Рассмотрен управляемый ускорителем подкритический каскадный реактор, состоящий из основного реактора на тепловых нейтронах с конструкцией, аналогичной реактору ВВЭР-1000, и реактора-бустера с такой же конструкцией, как у активной зоны реактора БН-350. Монте-карловским моделированием на ЭВМ показано, что такая система является безопасным источником энергии ( $k_{\text{eff}}=0,94-0,98$ ), способна эффективно трансмутировать образующиеся радиоактивные отходы и существенно снижает требования, накладываемые на ток протонного ускорителя (максимальный поток нейтронов в тепловой зоне  $\Phi^{\text{max}}(r,z)=10^{14} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , в быстрой зоне —  $\Phi^{\text{max}}(r,z)=2,25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  при  $k_{\text{eff}}=0,98$  и  $I=5,3 \text{ мА}$ ).

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2000

Перевод авторов

Bznuni S.A. et al.

P2-2000-137

Monte Carlo Modeling Electronuclear Processes  
in Cascade Subcritical Reactor

Accelerator driven subcritical cascade reactor composed of the main thermal neutron reactor constructed analogous to the core of the VVER-1000 reactor and a booster-reactor, which is constructed similar to the core of the BN-350 fast breeder reactor, is taken as a model example. It is shown by means of Monte Carlo calculations that such system is a safe energy source ( $k_{\text{eff}}=0.94-0.98$ ) and it is capable of transmuting produced radioactive wastes (neutron flux density in the thermal zone is  $\Phi^{\text{max}}(r,z)=10^{14} \text{ n}/(\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$ , neutron flux in the fast zone is respectively equal  $\Phi^{\text{max}}(r,z)=2.25 \cdot 10^{15} \text{ n}/(\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$  if the beam current of the proton accelerator is  $k_{\text{eff}}=0.98$  and  $I=5.3 \text{ mA}$ ). Suggested configuration of the «cascade» reactor system essentially reduces the requirements on the proton accelerator current.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2000

Редактор Е.Ю.Шаталова. Макет Н.А.Киселевой

Подписано в печать 14.06.2000

Формат 60 × 90/16. Офсетная печать. Уч.-изд. листов 1,05

Тираж 430. Заказ 52079. Цена 1 р. 26 к.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области