

РАСЧЕТ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В МИШЕНИ ИЗ СВИНЦА, ОБЛУЧАЕМОЙ ПРОТОНАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ, С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА “CASCADE/INPE”

А.Ю. Конобеев*, М. Векки**

** Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск*

*** ENEA, Болонья, Италия*



В статье представлены результаты расчета энерговыделения в свинцовой мишени, облучаемой высокоэнергетическими протонами с использованием комплекса программ CASCADE/INPE. Выполнено сравнение с имеющимися экспериментальными данными. Показано, что наибольший вклад в энерговыделение в мишени дают ионизационные потери первичных протонов и вторичных заряженных частиц, образующихся в ядерных реакциях, взаимодействие фотонов с веществом и эмиссия легких кластеров.

Определение энерговыделения в жидкометаллических мишенях, облучаемых высокоэнергетическими частицами, является составной частью теплогидравлического расчета подкритической установки [1], включающей ускоритель, мишенный комплекс и ядерный реактор.

В настоящей работе проведен теоретический расчет энерговыделения в свинцовой мишени, находящейся под действием протонного облучения. Выполнено сравнение с имеющимися экспериментальными данными [2,3], определены вклады в энерговыделение важнейших физических процессов, протекающих под действием первичного пучка.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИШЕНИ И ПЕРВИЧНОГО ПУЧКА ЧАСТИЦ

Расчеты проведены для цилиндрической мишени из свинца высотой 60 см и диаметром 20 см, результаты измерений для которой представлены в [2,3]. Характеристики такой мишени наиболее близки к параметрам мишени прототипа подкритического реактора [1].

Рассматривалось облучение мишени протонами с энергией 0.8 и 1.2 ГэВ.

МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ

Моделирование адронных и фотон-электронных каскадов в веществе, вызванных действием первичных частиц, проводилось методом Монте-Карло с помощью нового программного комплекса CASCADE/INPE [4].

Программный комплекс включает в себя модифицированную программу CASCADE [5], используемую для моделирования взаимодействий частиц с

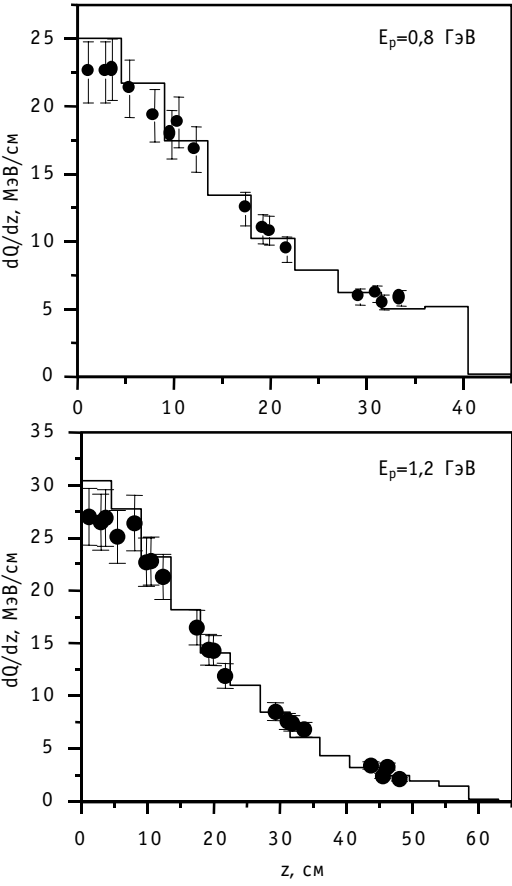


Рис.1. Линейная плотность энерговыведения dQ/dz в свинцовой мишени, рассчитанная с помощью программного комплекса CASCADE/INPE (гистограмма) и полученная экспериментально в [2,3] (темный кружок)

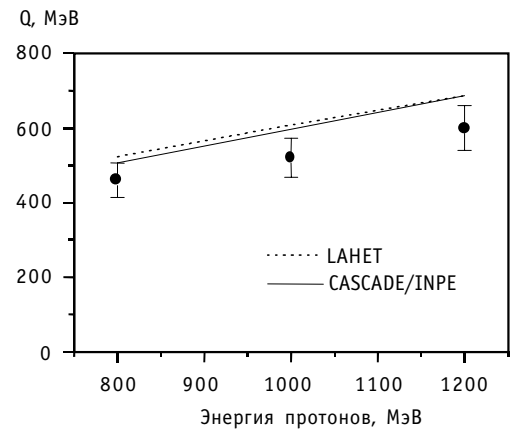


Рис.2. Полное энерговыведение, рассчитанное для свинцовой мишени в данной работе (—), с помощью LAHET (---) [3] и полученное экспериментально [2,3] (темный кружок)

энергией выше 20 МэВ, и программу MCNP/4B [6], применяемую для описания распространения в веществе нейтронов с энергией ниже 20 МэВ и γ -квантов с энергией до 1 ГэВ.

Основные изменения в программе CASCADE:

- использование нового геометрического модуля, позволяющего проводить расчеты для систем сложной конфигурации (например, активной зоны ядерного реактора);
- уточненные алгоритмы для описания адрон-ядерных процессов;
- использование систематики [7] для корректного описания угловых распределений нуклонов, испускаемых в области больших углов;
- расчет выхода продуктов деления на основе полуэмпирического подхода [8], позволяющего достичь согласия расчетных и экспериментальных массовых распределений в реакциях при энергиях выше 10 МэВ;
- описание (на основе подхода [9]) предравновесной эмиссии α -частиц, играющей важнейшую роль в протекании ряда физических процессов в свинцовых мишенях;
- применение нового алгоритма для расчета дифференциальных сечений упругого рассеяния нейтронов при энергиях ниже 100 МэВ;
- описание равновесной эмиссии фотонов, испускаемых фотонов в результате одночастичных переходов [10] при образовании «квазидейтрона» [11] и распаде π^0 -мезонов;
- использование современных экспериментальных и оцененных данных [12] для расчета упругих и неупругих адрон-ядерных взаимодействий.

В программу CASCADE включена также возможность моделирования спектров нейтронной эмиссии при энергиях до 50 МэВ [13] на основе оцененных данных, представленных в специальных файлах и записанных в

формате ENDF/B-VI. В программе расширено число элементов для описания исследуемых композиций (до 100), включена библиотека энергий отделения частиц, ионизационных потенциалов и других данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

На рис.1 показана линейная плотность энерговыделения dQ/dz для свинцовой мишени, облучаемой протонами с энергией 0.8 и 1.2 ГэВ. На рис.2 представлена зависимость полного энерговыделения в зависимости от энергии пучка, рассчитанная в данной работе, в работе [3] с помощью программного комплекса LANET и полученная экспериментально [2,3]. Видно, что расчетные данные согласуются с экспериментальными. Вместе с тем наблюдается некоторое систематическое завышение расчетных данных относительно результатов измерений (рис.2).

Вклады важнейших физических процессов в линейную плотность dQ/dz для мишени, облучаемой протонами с энергией 0.8 ГэВ, показаны на рис.3.

Наиболее подробно структура энерговыделения в свинцовой мишени представлена в табл.1. Из сравнения данных, приведенных в этой таблице, видно, что наибольший вклад в энерговыделение в мишени дают ионизационные потери первичных протонов и вторичных заряженных частиц, образующихся в ядерных реакциях, взаимодействие фотонов с веществом и эмиссия легких кластеров. Неуказанные в таблице потери на тормозное излучение заряженных частиц (мезонов и протонов) при рассматриваемых энергиях составляют для протонов и мезонов соответственно менее 10^{-5} и 10^{-3} их ионизационных потерь.

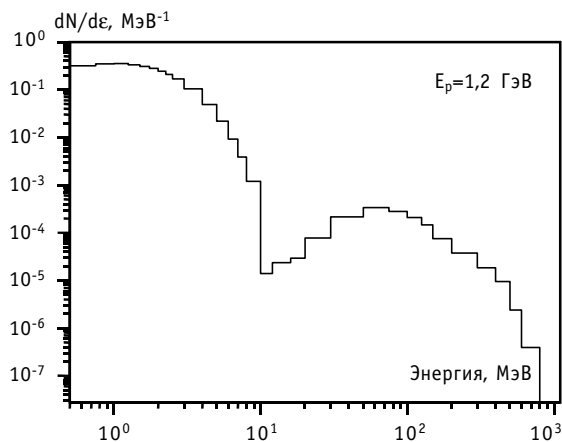


Рис.4. Спектр фотонов, образующихся в ядерных реакциях под действием частиц с энергией выше 20 МэВ в свинцовой мишени (20х60), облучаемой протонами с энергией 1.2 ГэВ

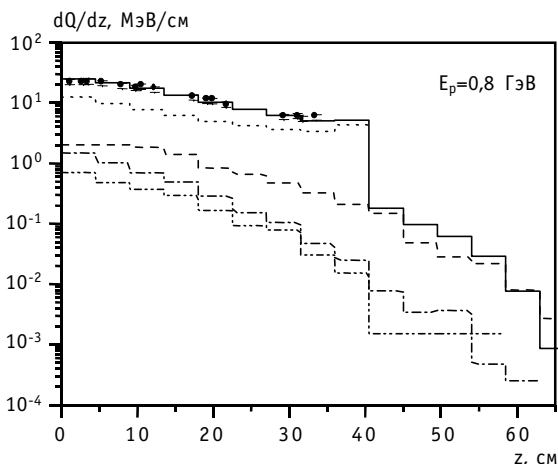


Рис.3. Вклад различных физических процессов в энерговыделение в свинцовой мишени, облучаемой протонами с энергией 0.8 ГэВ: полная величина (—); вклад ионизационных потерь первичной частицы (.....); взаимодействие фотонов с ядрами среды (- - -); образования кластеров ($d, t, {}^3\text{He}, \alpha$) (.-.-.); деления ядер свинца (---.-.-.)

Следует отметить, что значительная доля энергии, выделяющаяся при распространении в веществе фотонов, обусловлена процессом их образования при распаде π^0 -мезонов. Заметный вклад в энерговыделение в результате испускания легких фрагментов ($d, t, {}^3\text{He}, \alpha$) дает неравновесная эмиссия α -частиц.

Относительно распространения γ -квантов в веществе можно сделать следующее замечание: спектр фотонов, образующихся в ядерных реакциях, характеризуется распределением, в котором присутствуют фотоны как низкой, так и высокой энергии (см.рис.4), пробеги кото-

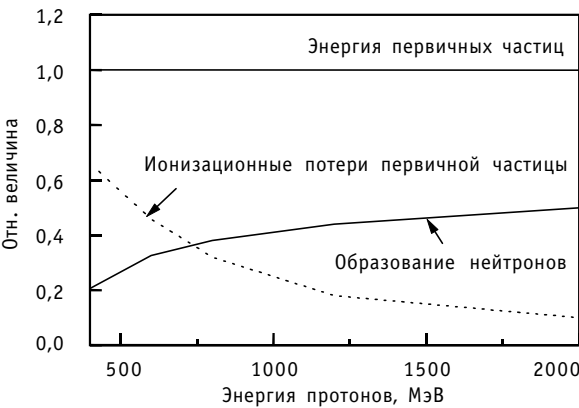


Рис.5. Относительная доля энергии первичного пучка протонов, идущая на образование нейтронов и ионизационные потери первичной частицы

ближении локально выделившейся энергии необходимо проводить с известной долей осторожности, если задачей является восстановление не только линейной, но и объемной плотности энерговыделения.

Основное назначение мишени подкритической установки состоит в производстве нейтронов. На рис.5 представлена рассчитанная относительная доля энер-

рых в веществе заметно отличаются по величине. Вместе с тем расчет $(dQ/dz)_\gamma$ для фотонов в предположении, что их энергия выделяется локально, т.е. в месте их образования, дает величины, близкие к результатам точных вычислений (см. рис.3). Средняя погрешность такого расчета составляет 15% при энергии первичных протонов 0.8 ГэВ и 3% при энергии 1.2 ГэВ.

Несмотря на отмеченное обстоятельство расчет энерговыделения для γ -квантов в при-

Таблица 1

Вклад различных физических процессов в энерговыделение свинцовой мишени (МэВ), облучаемой протонами с энергией 0.8 и 1.2 ГэВ

Величина	Энергия первичных протонов, МэВ	
	800	1200
Суммарная величина	506.42 (100.0%)	686.61 (100.0%)
Ионизационные потери первичной частицы	256.27 (50.6%)	215.28 (31.4%)
Ионизационные потери вторичных (образующихся в реакциях) частиц	180.23 (35.6%)	312.72 (45.5%)
Взаимодействия фотонов	36.35 (7.2%)	88.43 (12.9%)
Взаимодействия фотонов, образующихся в результате адрон-ядерных реакций при энергиях адронов выше 20 МэВ	20.85	60.62
Взаимодействия фотонов, образующихся при распаде π^0 -мезонов, возникающих в адрон-ядерных реакциях	11.97	41.01
Ядра отдачи	3.92 (0.8%)	5.66 (0.8%)
Ядра отдачи, образующиеся в реакциях под действием первичных частиц с энергией выше 20 МэВ	3.19	4.22
Деление ядер свинца	10.12 (2.0%)	16.33 (2.4%)
Образование легких кластеров (d,t, ^3He и α -частиц)	19.53 (3.9%)	48.19 (7.0%)
Неравновесные α -частицы	7.84	18.08

гии первичного пучка, которая идет на образование нейтронов, в зависимости от энергии пучка. Расчеты проведены для свинцовой мишени диаметром 20 см и высотой, превышающей полный пробег протонов в свинце. Видно, что доля энергии, которая идет на образование нейтронов, плавно изменяется от 20% при энергии первичных протонов 0.4 ГэВ до 50% при энергии 2 ГэВ.

Авторы выражают признательность Ф.И. Карманову, Л.Н. Латышевой и В.Н. Соснину за интересные и стимулирующие обсуждения.

Литература

1. Energy Amplifier Demonstration Facility Reference Configuration // Report Ansaldo, EA B0.00 1 199 Rev.0, 22.12.1998; EA B0.00 1 200 Rev.0, January 1999.
2. Belyakov-Bodin V.I., Kazaritsky V.D., Povarov A.L. et al. Calorimetric measurements and Monte Carlo analysis of medium-energy protons bombarding lead and bismuth targets // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. – 1990. – V.A295. – P.140.
3. Beard C.A., Belyakov-Bodin V.I. Comparison of energy deposition calculations by the LAHET code systems with experimental results // Nucl. Sci. Eng. – 1995. – V.119. – P.87.
4. Konobeyev A.Yu., Korovin Yu.A., Sosnin V.N., Vecchi M. Study of accelerator-driven reactor systems // Kerntechnik. – 1999. – V.64. – P.284.
5. Барашенков В.С., Ле Ван Нгок, Левчук Л.Г. и др. Программный комплекс «КАСКАД» для монтекарловского моделирования ядерно-физических процессов, инициируемых высокоэнергетическими частицами и ядрами в газообразных и конденсированных средах: Препринт ОИЯИ. – Дубна, 1985. – P2-85-173.
6. Briesmeister, Ju.F. MCNP-a general Monte Carlo n-particle transport code // Report LA-12625-M, March, 1997.
7. Kalbach C. Systematics of continuum angular distributions. Extensions to higher energies // Phys. Rev. – 1988. – V.C37. – P. 2350-2370.
8. Konobeyev A.Yu., Korovin Yu.A., Vecchi M. Fission product yields in nuclear reactions induced by intermediate energy particles // Kerntechnik, 1999. – V.64. – P.216.
9. Конобеев А.Ю., Соснин В.Н. Расчет спектров α -частиц для свинцовой мишени, облучаемой протонами высоких энергий // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1998. – №3. – С.35-39.
10. Oblozinsky P. Pre-equilibrium γ -rays from single-particle radiative transitions in the hybrid model // Phys. Lett. – 1988. – V.B215. – P.597-601.
11. Конобеев А.Ю., Коровин Ю.А., Переславцев П.Э. Расчет спектров эмиссии жестких γ -квантов, образующихся в ядерных реакциях, протекающих под действием частиц промежуточных энергий // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – №1. – С.38-44.
12. Barashenkov V.S., Polanski A. Electronic Guide for Nuclear Cross Sections // JINR, ICTA, Dubna, distributed by IAEA, 1990.
13. Korovin Yu.A., Konobeyev, A.Yu., Pereslavl'tsev P.E. et al Evaluation and test of nuclear data for investigation of neutron transport, radiation damage and processes of activation and transmutation in materials irradiated by intermediate and high energy particles // In: Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology (Trieste, Italy, May 1997). – Trieste, 1997. – P. 851-855.

Поступила в редакцию 24.01.2000.

to $(\tau)^{0.5}$ and depends on the rate introducing of reactivity and is inversely proportional to the feedback reactivity.

УДК 519.688:539.172.12

Calculation of Energy Release in Lead Target Irradiated with High Energy Protons with the Help of "CASCADE/INPE" Code System \A. Yu. Konobeyev, M. Vecchi; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages, 5 illustrations, 1 table. – References, 13 titles.

The calculation of energy release has been performed with the help of CASCADE/INPE code system for lead target irradiated with high energy protons. The comparison with available experimental data has been made. The results show that the main contribution to the energy release for the lead target is due to ionization losses of primary protons, ionization losses of secondary charged particles produced in nuclear reactions, photon interactions and light fragment emission from excited nuclei.

УДК 621.039.526

On Physical Characteristics of the Fast Reactors with the Na-Pb Coolant \A.M. Kuzmin, V.S. Okunev, A.N. Shmelev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 3 illustrations, 2 tables. – References, 9 titles.

The possibility of implementation of the Na-Pb alloy as a coolant of fast reactors is analysed. Some physical characteristics and minimal void reactivity coefficient received for the BN-800 reactor are given.

УДК 621.039.526

Research on the Characteristics of Inherent Self-Protection of the Fast Reactor with the Sodium-Lead Coolant \A.M. Kuzmin, V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 3 illustrations, 3 tables. – References, 3 titles.

Some optimal inherent safety characteristics of LMFRs cores cooled with an alloy of sodium and lead, and ATWS analysis are presented in this paper. The core concept is based on the BN-800 design concept fuelled with UN-PuN. These results can be useful for the design of new generation of nuclear reactors.

УДК 621.039.526

Selection of Basic Parameters and Characteristics of a Perspective Fast Power Reactor with Sodium Coolant \V.I. Matveev, V.A. Eliseev, I.V. Malysheva; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 1 illustration, 4 tables. – References, 6 titles.

On the base of big experience of Russia in design and operation of fast power reactors the concept of new generation fast reactors is developed which meets all requirements on the inherent safety, high ecological compatibility of fuel cycle and the ability to natural uranium economy even at low breeding parameters.

УДК 621.039.526

The Possible Conceptual Framework and Optimization of Safety Characteristics of the LMFRs with Different Types of Fuels and Cooled with the Na-K-Cs-alloy \V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 3 tables. – References, 5 titles.

The layout of the LMFR with different types of fuels and cooling with the Na-K-Cs-alloy are discussed. The results are present of the solution of optimization problems with limitations for safety functionals characterizing an accident situations of ATWS types.

УДК 621.039.52.034.6

Thermodynamics and Kinetics of Interaction of Oxygen and Nickel Impurities in Lead-Bismuth Eutectic Alloy \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. – 6 pages, 3 illustrations, 2 tables. – References, 8 titles.