

УДК 621.039.54

МИШЕНИ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ SAD

В. С. Барашенков

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Методом Монте-Карло моделируются свойства нескольких вариантов мишени для создаваемой в Дубне электроядерной установки на пучке 660-МэВ протонов фазотрона ОИЯИ. Обсуждаются тепловыделение, выход нейтронов, γ -квантов и заряженных частиц. Показано, что рассматриваемая в настоящее время в качестве основной 19-стержневая мишень может быть существенно упрощена.

Various designs of the target for ADS SAD created now in Dubna on the proton beam of JINR phasotron with energy 660 MeV are investigated by Monte Carlo method. Heat production, yield of neutrons, γ -quanta and charged particles are discussed. It is shown that the 19-rod target considered now as a basic one can be simplified essentially.

В соответствии с грантом Международного научно-технического центра (МНТЦ) в Дубне на протонном пучке фазотрона ОИЯИ с энергией 660 МэВ и интенсивностью $I \simeq 1$ мкА создается электроядерная установка SAD (Subcritical Assembly in Dubna) с уран-плутониевым топливом MOX, воздушным охлаждением и свинцовой мишенью. Тепловая мощность установки 10–30 кВт. Протонный пучок с диаметром поперечного сечения 3 см и гауссовской пространственной дисперсией интенсивности вводится вдоль центральной оси мишени на глубину $Z_0 = 10$ см. Пучок инициирует каскад реакций расщепления, в которых рождаются нейтроны, γ -кванты и заряженные частицы. При этом вследствие ионизационных процессов большая часть энергии пучка затрачивается на разогрев мишени. В тепловыделение дают вклад как первичные протоны, так и рождающиеся вторичные заряженные частицы и ядра отдачи. Диаметр и длина мишени должны быть достаточными для того, чтобы аккумулировать большую часть ионизационного тепловыделения и вместе с тем не приводить к значительному снижению коэффициента мультипликации нейтронов K_{eff} в окружающем мишень бланкете.

Цель нашей статьи — оценить путем математического моделирования тепловыделение, выход нейтронов, γ -квантов и рождающихся в реакциях расщепления заряженных частиц для нескольких возможных конструкций мишени установки SAD. Расчеты выполнены методом Монте-Карло для разработанного в ОИЯИ и основанного на каскадно-испарительной модели (с учетом конкуренции реакции деления) программного комплекса CASCADEE [1, 2]. Сечения ядерных взаимодействий при энергиях $E > 10,5$ МэВ определялись путем интерполяции оцененных экспериментальных данных [3, 4]. Моделирование транспорта нейтронов при $E < 10,5$ МэВ выполнялось в 26-групповом приближении с использованием системы реакторных констант [5]. Учтена упомянутая выше пространственная дисперсия протонного пучка с максимумом интенсивности в центре поперечного сечения мишени. Глубина, на которую вводится пучок протонов, $Z_0 = 10$ см.

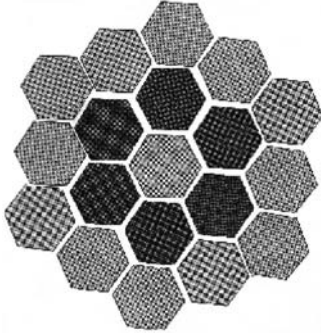


Рис. 1. Поперечный разрез 19-компонентной мишени установки SAD. Более темные области — стержни с каналами воздушного охлаждения

На рис. 1 изображен один из предлагаемых проектан-тами вариантов мишени. Мишень состоит из 19 свинцовых шестигранных стержней длиной 60 см и диаметром попе-речного сечения стержня (диаметром вписанной окружно-сти) 3,45 см, включая стальную защитную оболочку тол-щиной 2 мм. Расстояние между центрами стержней 3,6 см. Каждый из шести стержней, окружающих центральный, содержит вплавленную U-образную стальную трубку диа-метром 5 мм для воздушного охлаждения.

В табл. 1 показано, как влияют различные компоненты мишени на выход нейтронов и величину выделяющейся в ней энергии. Рассчитаны четыре варианта:

- А — мишень состоит из одного центрального стержня без оболочки;
- В — то же, но добавлена стальная 2-мм оболочка;
- С — добавлен слой из шести содержащих воздухопро-воды стержней;
- Д — мишень с 19 стержнями.

Из сравнения двух первых вариантов видно, что стальная оболочка стержня слабо ска-зывается на свойствах мишени. В обоих случаях мишень аккумулирует большую часть, около 70 %, энергии первичного пучка. При этом протоны уносят лишь треть оставшейся энергии: $Q_p/E \simeq 10\%$. Две трети уносят нейтроны. Если бы мишень состояла только из одного центрального стержня, то энергия вылетающих из нее протонов пошла бы практически целиком на нагревание соседних слоев бланкета (ионизационный пробег протонов с энергией 50–70 МэВ меньше 1 см), а за счет энергии нейтронов в реакциях низкоэнергетического деления будут генерироваться нейтроны. Гамма-кванты, рождаю-щиеся в основном при переходах остаточных слабозбужденных послекаскадных ядер в их основные состояния, уносят менее двух процентов первичной энергии, однако, хотя

Таблица 1. Выход нейтронов и распределение энергии (МэВ) в мишени SAD, облучаемой пучком протонов с энергией 660 МэВ (в расчете на один первичный протон)

Мишень	А	В	С	Д
Диаметр мишени, см	3,45	3,85	10,22	16,46
Выход нейтронов N_n	7,8	7,9	9,0	9,9
Деление ядер	2	2	2	2,2
Ионизационные потери каскадных частиц	329	349	381	395
Ионизационные потери ядер в реакциях при $E > 10,5$ МэВ	99	101	114	127
То же при $E \leq 10,5$ МэВ	1,3	1,7	4,3	7,1
Энергия остановившихся частиц и ядер	16	16	18	19
Энергия вылетевших нейтронов	135	131	113	93
Энергия вылетевших протонов	73	53	16	4
Энергия γ -лучей	11	12	14	29
Q/E , %	68	71	79	82
Q_p/E , %	11	10	2,4	0,5

их средняя энергия составляет всего только несколько МэВ, в спектре γ -излучения присутствует высокоэнергетическая компонента с энергией $E_\gamma \geq 70$ МэВ, образующаяся в результате распада π^0 -мезонов. Это проникающее излучение необходимо учитывать при конструировании радиационной защиты.

Из таблицы видно, что вклад деления пренебрежимо мал. (Оно происходит при $E > 10$ МэВ, при меньших энергиях свинец делится крайне редко).

Следует также отметить, что выход нейтронов N_n несколько меньше, чем в неупругом столкновении $p + \text{Pb}$ при $E = 660$ МэВ, где $N_n \simeq 12$. Это объясняется тем, что благодаря ионизационным потерям неупругое ядерное взаимодействие протона в веществе мишени происходит при энергии, значительно меньше начальной.

Добавление слоя из шести стержней с каналами воздушного охлаждения позволяет аккумулировать практически все ионизационные потери. При этом доля энергии, уносимой из мишени нейтронами, остается почти неизменной. Периферический слой из 12 стержней лишь незначительно повышает Q/E , зато существенно, на 60 %, увеличивает диаметр мишени, что при фиксированном количестве топлива MOX приведет к уменьшению K_{eff} .

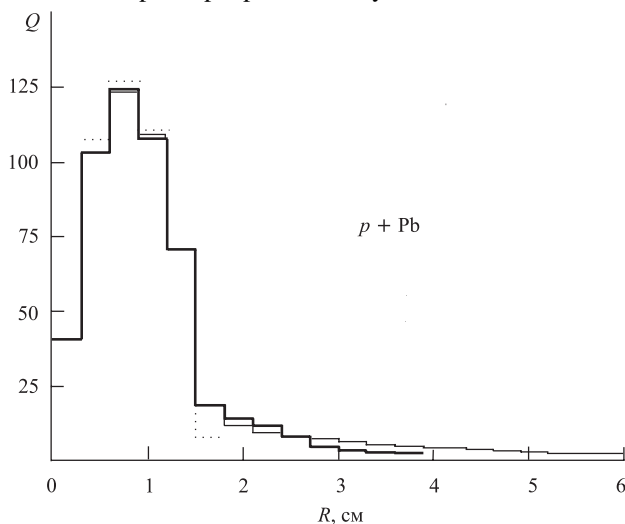
Из приведенных данных видно, что вполне достаточным является использование мишени с семью центральными стержнями. Это подтверждается также радиальной зависимостью тепловыделения

$$Q(r) = \int Q(z, r) dz,$$

представленной на рис. 2. Основная часть тепла выделяется в области с радиусом $R \simeq 1,5$ см, совпадающим с размером коллимированного протонного пучка. При больших значениях R тепловыделение резко уменьшается и его вклад составляет лишь проценты.

Во всех случаях большая часть тепловыделения происходит на расстоянии $Z \leq 25-30$ см от точки входа протонного пучка в мишень с максимумом вблизи точки входа. Тепловыделение на больших расстояниях незначительно. Поскольку длина мишени $L = 60$ см значительно превосходит ионизационный пробег протонов, данные табл. 1 остаются практически неизменными при варьировании глубины входного окна $Z_0 \simeq 0-20$ см. Следует, однако, иметь в виду, что при наличии делящегося blankets зависимость от Z_0 станет более существенной, так как глубина окна определяет объем топлива, в котором происходит наибольшее число делений.

Рис. 2. Радиальное распределение выделяющегося в мишени тепла. Толстая и тонкая сплошные гистограммы — расчетные данные для мишеней С и D, пунктирная — для мишени В (МэВ). Данные в расчете на один первичный протон



Альтернативой изображенной на рис. 1 многостержневой мишени может служить цилиндрическая мишень с диаметром 8 см, параметры которой подробно исследованы в работе [6]. Как видно из табл. 2, по выходу нейтронов и аккумуляции тепла такая мишень не уступает многостержневой. Удвоение диаметра лишь незначительно изменяет ее свойства.

Таблица 2. Выход нейтронов и тепловыделение в цилиндрических свинцовых мишенях в расчете на один первичный 660-МэВ протон. Длина мишени 60 см, диаметр 8 и 16 см, точка входа пучка $Z_0 = 10$ см. Остальные обозначения, как в табл. 1

Диаметр, см	8	16
Выход нейтронов N_n	9,1	10,6
Q/E , %	78	93
Q_p/E , %	3	0,4

Для протонных пучков с мощностью около 10 кВт, как это планируется для установки SAD, теплосъем может осуществляться периферическим потоком воздуха. Диаметр мишени с учетом окружающего мишень воздухопровода и 2-мм внешней стенкой составляет около 9,4 см — намного меньше, чем в рассмотренной выше 19-стержневой конструкции. Оправдание использованию последней можно видеть лишь в том, что она позволит без реконструкции бланкета работать со сменными мишенями меньших размеров, размещая в объеме между мишенью и бланкетом дополнительную измерительную аппаратуру¹.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barashenkov V. S.* // *Comp. Phys. Commun.* 2000. V. 126. P. 38.
2. *Barashenkov V. S., Kumawat H.* Development of Monte Carlo model of high-energy nuclear interactions // *Nucl. Instr. Meth.* (submitted).
3. *Барашенков В. С.* Сечения взаимодействия частиц и ядер с ядрами. Дубна: ОИЯИ, 1993.
4. *Barashenkov V. S., Gudowski W., Polanski A.* Integral high-energy nucleon–nucleus cross-sections for mathematical experiments with electronuclear facilities. JINR, E2-99-206. Dubna, 1999.
5. *Абагян Л. П. и др.* Групповые константы для расчета реакторов и защиты. М.: Энергоатомиздат, 1981.
6. *Барашенков В. С. и др.* Мишени электроядерных установок // *Письма в ЭЧАЯ.* 2005. Т. 2, № 4(127). С. 66.

Получено 27 сентября 2004 г.

¹Такой вариант обсуждался на международном совещании, посвященном возможной конструкции SAD.