Ордена Ленина ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им. М.В. Келдыша РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Воронков А.В., Ефремов Е.В., Земсков Е.А., Иванов Н.А., Казновский С.П., Кривопустов М.И.,Соболевский Н.М.

"РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛЕЙ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В МИШЕНЯХ, ОБЛУЧАЕМЫХ ПУЧКОМ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ"

Москва – 2000

<u>АННОТАЦИЯ</u>

Данная работа является продолжением исследований, выполняемых Объединенным Институтом Ядерных Исследований (ОИЯИ, г. Дубна), Институтом Прикладной Математики им. Келдыша РАН (ИПМ, г. Москва) и Всероссийским Научно-Исследовательским и проектно-констроукторским Институтом Атомного энергетического Машиностроения Минэкономики (ВНИИАМ, г. Москва) под руководством академиков А.М. Балдина и В.И. Субботина по проблеме электроядерной энергетики и трансмутации радиоактивных отходов [1,2].

Составной частью этих исследований являются эксперименты по термометрии мишени, "разогреваемой" пучком протонов. Они позволяют получить временной ход температуры в различных точках мишени и тем самым дают возможность оценить внутреннее энерговыделение, обусловленное процессами взаимодействия протонов с веществом мишени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (№ Проекта 00-01-00290)

Voronkov A.V., Efremov E.V., Zemskov E.A., Ivanov N.A., Kaznovskiy S.P., Krivopustov M.I., Sobolevskiy N.M.

CALCULATED ANALYSIS OF THE FIELDS OF HEATPRODUCTION IN TARGETS, IRRADIATED BY THE BEAM OF RELATIVISTIC PROTONS

ABSTRACT

This work is an extension of investigations, carried out in the Joint Institute of Nuclear Research (JINR, Dubna), the Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS (KIAM, Moscow) and the All-Russia Science-Technical Institute of Atomic Energetic Engineering (ASTIAEE, Moscow) under the management of academics A.M. Baldin and V.I. Subbotin on the problem of electrical nuclear power engineering and transmutation of radioactive waste [1,2].

The work consists of the experiments on the theory of a target, "warmed up" by a proton beam. They allow to receive the history of temperature in different points of a target and so give an opportunity to estimate the internal heatproduction, caused by the interaction of protons with the substance of a target.

This work was supported by the Russian Foundation for Fundamental Investigations (Project # 00-01-00290)

ОГЛАВЛЕНИЕ:

	Введение	4
1.	Расчет энерговыделения в сборке мишень+бланкет (сборка 2)	7
2.	Сравнение результатов расчета энерговыделения по различным программам	10
3.	Расчет энерговыделения в массивной свинцовой мишени (сборка 1)	16
	Заключение	21
	Литература	22

Введение

Данная работа является продолжением исследований, выполняемых Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна), Институтом прикладной математики им. Келдыша РАН (ИПМ, г. Москва) и Всероссийским научно-исследовательским И проектно-констроукторским институтом атомного энергетического машиностроения Минэкономики (ВНИИАМ, г. Москва) под руководством академиков А.М. Балдина и В.И. по электроядерной Субботина проблеме энергетики И трансмутации радиоактивных отходов [1,2].

Составной частью этих исследований являются эксперименты по термометрии мишени, "разогреваемой" пучком протонов. Они позволяют получить временной ход температуры в различных точках мишени и тем самым дают возможность оценить внутреннее энерговыделение, обусловленное процессами взаимодействия протонов с веществом мишени.

Следует отметить, что экспериментов по прямому определению энерговыделения (калориметрических измерений) довольно мало. Известны работы по определению энерговыделения в различных образцах, помещенных вблизи свинцовой мишени на установке TRIUMF [3] и комплекс экспериментов по калориметрическим измерениям внутри различных мишеней, проведенных в ИТЭФ [4-6]. Первые эксперименты выполнены на пучке протонов с энергией 500 Мэв, вторые- для диапазона энергий 800-1200 Мэв.

Обсуждаемые в настоящей работе эксперименты по термометрии, основанные на использовании малоинерционных высокочувствительных микротермопар, существенно расширяют объем результатов по оценке энерговыделения. Они выполнены для более высоких энергий протонов (1.5Гэв, 5Гэв) и для различных экспериментальных сборок.

Первая сборка представляет из себя массивную свинцовую мишень с размерами 50x50x80 см. (масса 2300 кг.), набранную из отдельных блоков. Схематично она изображена на рис.1.

Вторая сборка по геометрии более сложная, она включает в себя собственно цилиндрическую свинцовую мишень и окружающий ее бланкет, набранный из стержней обедненного урана. Ее общий вид представлен на рис. 2. Секционная свинцовая мишень имеет диаметр 8.4 см, она разделена на две части текстолитовой пластиной толщиной 0.5 см, общая длина свинцовой части 50 см., масса ≈ 31 кг. Бланкет, тесно прижатый к мишени, имеет две секции, содержащих по два ряда урановых стержней. Каждый стержень из естественного урана, упакованный в герметичную алюминиевую оболочку толщиной 0.05 см, имеет следующие внешние размеры: диаметр 3.6 см., длина 10.4 см, масса стержня равна 1720 г. В состав каждой секции входит 30 урановых стержней, имеющих общую массу 51.6 кг. Металлический каркас, в котором монтируются урановые стержни, после сборки позволяет жестко фиксировать положение каждого стержня в шестигранной упаковке.







Рис 2. Общий вид уран-свинцовой сборки (сборка 2)

Для расчетного анализа проведенных экспериментов по термометрии мишеней требуется нахождение решения нестационарного уравнения теплопроводности с заданными нестационарными внутренними источниками энергии. Для определения этих источников тепла (энерговыделения в объемах мишеней) были использованы как отечественные программные комплексы SHIELD [11], PARSE-2 [8], так и зарубежный код LAHET [9,10].

Транспортный код SHIELD предназначен компьютерного для моделирования взаимодействия частиц высоких энергий co сложными макроскопическими мишенями. Он создавался как универсальный инструмент для широкого круга исследований. Первоначальная версия кода SHIELD была разработана в ЛТФ ОИЯИ в начале 1970-х гг [7,12] на основе Дубнинской каскадно-испарительной модели ядерных реакций, подробно описанной в монографии [13] и обзоре [14]. В дальнейшем код SHIELD совершенствовался, а в 1989-90 гг был полностью переработан с учетом требований современных задач. Современная версия кода SHIELD [11] включает в себя известные отечественные модели ядерных реакций, обеспечивающие моделирование неупругих адрон-ядерных взаимодействий в эксклюзивном подходе в области энергий до 1 ТэВ [15]. Некоторые примеры применения кода SHIELD можно найти в [16-24].

Комплекс программ PARSE-2 [8] позволяет решать уравнение переноса, описывающее распространение в сложной трёхмерной геометрии адронного каскада, порождённого нуклонами источника с энергиями от 20 МэВ до 10 ГэВ. Ядерные взаимодействия заряженных частиц каскада (протонов и пионов) рассчитываются до энергий 20 МэВ. Радиационное торможение заряженных частиц моделируется до энергии 3,68 МэВ, по достижении, которой последние считаются остановившимися и поглощёнными ядрами. В настоящее время комплекс программ PARSE-2 снабжён библиотекой сечений нуклонов с энергиями от 3,68 до 1500 МэВ полученной в расчётах по программе ELEM, в основу которой положены аппроксимационные формулы Б.С.Сычёва. Расчёт взаимодействий нейтронов с энергиями ниже 18 МэВ ведётся с использованием библиотек сечений нейтронов семейства АРАМАКО [25].

Программный комплекс LAHET (LCS: The Lahet Code System), разработанный в Лос-Аламосской национальной лаборатории [9] представляет по сути дела удачное соединение двух программных кодов – НЕТС [26] и MCNP [10]. Первая программа рассчитывает методом Монте Карло взаимодействие и перенос в веществе высокоэнергетических нуклонов (протонов, нейтронов), пионов и мезонов, вторая рассчитывает методом Монте Карло процессы переноса нейтронов с энергией, меньшей 20 МэВ и фотонов с энергией меньше 100 МэВ. В настоящее время комплекс LAHET широко используется проектирования интенсивных мишенных для анализа И нейтронных источников, в которых мишень облучается пучком заряженных получаемых на ускорителе. В расчетах для данной работы частиц, использовались стандартные расчетные возможности программного комплекса LAHET. В качестве модели нуклон-ядерного каскада использовалась модель Бертини, подробно представленная в работах [27,28], стадия испарения составного ядра, включающая в себя фрагментацию и деление ядра, испускание нейтронов и протонов, рассчитывалась по моделям Ф. Ачисона [29] и Л. Дреснера [30] с использованием модели расщепления для легких ядер Э. Ферми. В качестве модели плотности энергетических уровней ядер использовалась комбинированная модель Гильберта-Камерона-Кука-Игнатюка [31]. Расчеты физических процессов, связанных с нейтронами с энергией меньше 20 МэВ по программе MCNP, были проведены с использованием стандартных библиотек сечений (файлы RMCCS, RMCCSA, ENDF5P, ENDF5U), полученных из файлов оцененных данных ENDF/B-V [32].

Целью настоящей работы является сравнение расчетных значений энерговыделения, получаемых по различным программам. Это сравнение подробно выполнено для второй как более сложной уран-свинцовой сборки. Для первой массивной свинцовой мишени приведены результаты расчета энерговыделения только по коду LAHET.

Эта работа является первым этапом по расчетному анализу экспериментов по термометрии.

1. Расчет энерговыделения в сборке мишень+бланкет (сборка 2)

Эта мишень облучались пучком протонов с энергией 1.5 Гэв, получаемых на синхрофазотроне, работающем в циклическом режиме. Импульс пучка имеет длительность около 0.3 сек, время между импульсами 9 сек. Таким образом, цикл работы ускорителя составляет 9.3 сек. За один такой цикл на мишень попадает около 10¹¹ протонов.

В ходе описываемого эксперимента было проведено облучение длительностью около 43 мин. Подробный временной график мощности пучка приведен в приложении А. Здесь отметим только, что за время облучения в мишень попало 2.37E+13 протона, средняя мощность пучка равна 2.18 вт

Для сравнительного анализа расчет энерговыделения был выполнен в реальной геометрии, точно моделировалась свинцовая мишень, в каждом блочке урана точно учитывалась как зона с ураном, так и алюминиевая оболочка блочка. В этой геометрии проведены расчеты по программам SHIELD, PARSE-2, LAHET.

Исходные данные для расчета в реальной геометрии:

- радиус мишени 4.435 см;
- длина мишени 50.3 см;
- внешний радиус блочка урана 1.8 см;
- толщина алюминиевой оболочки 0.05 см;
- длина уранового блочка 10.4 см;
- общее число урановых блочков 60 шт.

	Мишень	Урановый	Оболочка	Текстол	Воздух
		блочок		ИТ	
Pb	0.03295	-	-	-	-
²³⁵ U	-	0.0003458	-	-	-
²³⁸ U	-	0.04672	-	-	-
AL	-	-	0.05997	-	-
Н	-	-	-	0.05592	-
С	-	-	-	0.1119	
0	-	-	-	-	0.000012
Ν	-	-	-	-	0.000042

Таблица 1. Ядерный состав сборки (ядро/см**3*10⁻²⁴):

Расчетная модель в реальной геометрии представлена на рис. 4 и 5. Мишень включает в себя ячейки с 1 по 60, в бланкете выделен сектор симметрии из четырех стержней (1,2,13,14). Каждый стержень по высоте состоит из двух частей по 10.4 см, каждая часть разделена 5 зон. Всего отдельный стержень занимает 20 ячеек- 10 уран и 10 алюминиевая оболочка.

Во всех расчетах параметры пучка протонов брались одинаковыми, а именно: энергия протона 1,5 Гэв, плотность пучка протонов была распределена по функции Гаусса:

$$p(x, y) = \frac{\exp\left[-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2\right]\right]}{2\pi ab},$$

где a=b=1,2 см.



Рис 4 Продольное сечение расчетной модели уран-свинцовой сборки



Рис 5 Поперечное сечение расчетной модели уран-свинцовой сборки -область серого цвета – свинцовая мишень, цилиндры с номерами 1-30 – урановые стержни

2. Сравнение результатов расчета энерговыделения по различным программам

Основными процессами, определяющими выделение энергии в объеме мишени являются процессы ионизации атомов среды заряженными частицами, процессы взаимодействия с ядрами нейтронов и фотонов, нарабатываемых в протон-ядерном каскаде, прямое деление ядер среды, β , γ - излучение и др.

В таблице 2 приведены интегральные величины энерговыделения для различных составных частей сборки мишень-бланкет, полученные по трем программам. Наблюдается хорошее согласие в расчетах по программам SHIELD и LAHET, расхождения не превышают по всем величинам 7%, в общем энерговыделении расхождение не превышает 3%. Результаты по программе PARSE-2 отличаются на 12-14%.

	LAHET	SHIELD	PARSE-2
мишень	670	667	588
бланкет:			
1-й блок	28.1	26.9	
2-й блок	33.0	30.8	
13-й блок	11.0	10.9	
14-й блок	14.6	14.58	
общее энерговыд.	607	582	570
Общее энерговыделение в сборке			
	1280	1250	1180

Таблица 7 Интегральные значения энерговыделения (Мэв/протон)

Более детальное сравнение значений энерговыделения по расчетным ячейкам для свинцовой мишени, по ячейкам отдельных урановых блоков бланкета (отдельно для урана и алюминиевой оболочки) приведено в таблицах 2-3.

Дифференциальные значения энерговыделения, расчитанные по SHIELD и LAHET, в области "факела" протонного пучка и в уране бланкета хорошо согласуются между собой, на периферии мишени и в алюминиевых оболочках имеются существенные различия. Они объясняются тем, что в программном комплексе LAHET учитывается перенос не только протонов и нейтронов, но и перенос фотонов, что обеспечивает дополнительный вклад в энерговыделение в периферийных ячейках. Однако эти значения по удельному вкладу в общее энерговыделение малы, и на расчет температурных полей различия влияют рисунках приведены графики распределений незначительно. Ha 6-8 энерговыделения в различных частях облучаемой сборки, подтверждающие этот вывод.

[1		1		1	1	1
Ном.	SHIELD	LAHET	PARSE-2	Ном.	SHIELD	LAHET	PARSE-2
ячейки				ячейки			
1	2.36E+00	2.24E+00	2.07E+00	21	6.80E-01	7.14E-01	5.58E-01
2	2.33E+00	2.25E+00	2.12E+00	22	7.10E-01	7.51E-01	6.10E-01
3	2.13E+00	2.07E+00	1.98E+00	23	6.78E-01	7.20E-01	5.90E-01
4	1.89E+00	1.89E+00	1.77E+00	24	6.22E-01	6.71E-01	5.44E-01
5	1.71E+00	1.71E+00	1.57E+00	25	5.57E-01	6.20E-01	5.00E-01
6	1.48E+00	1.54E+00	1.41E+00	26	5.08E-01	5.65E-01	4.54E-01
7	1.29E+00	1.34E+00	1.24E+00	27	4.43E-01	5.11E-01	3.97E-01
8	1.16E+00	1.16E+00	1.09E+00	28	3.89E-01	4.63E-01	3.54E-01
9	9.88E-01	1.01E+00	9.45E-01	29	3.34E-01	4.15E-01	3.06E-01
10	8.52E-01	8.67E-01	8.16E-01	30	2.98E-01	3.69E-01	2.74E-01
12	7.22E-01	7.27E-01	6.91E-01	32	2.60E-01	3.30E-01	2.36E-01
13	6.28E-01	6.17E-01	6.32E-01	33	2.21E-01	2.93E-01	2.03E-01
14	5.44E-01	5.20E-01	5.45E-01	34	1.94E-01	2.55E-01	1.79E-01
15	4.70E-01	4.33E-01	4.66E-01	35	1.68E-01	2.25E-01	1.59E-01
16	4.19E-01	3.58E-01	4.19E-01	36	1.47E-01	1.96E-01	1.38E-01
17	3.22E-01	2.62E-01	3.33E-01	37	1.16E-01	1.55E-01	1.15E-01
18	2.28E-01	1.62E-01	2.41E-01	38	8.44E-02	1.07E-01	8.12E-02
19	1.58E-01	9.94E-02	1.88E-01	39	5.92E-02	7.14E-02	5.74E-02
20	1.06E-01	5.93E-02	1.17E-01	40	4.28E-02	4.63E-02	3.99E-02

Таблица 2 Энерговыделение по ячейкам свинцовой мишени (Мэв/см**3/протон) по ячейкам свинцовой мишени (Мэв/см**3/протон)

Ном. ячейки	SHIELD	LAHET	PARSE-2
41	7.05E-02	7.31E-02	5.40E-02
42	9.55E-02	9.16E-02	6.55E-02
43	1.08E-01	9.84E-02	7.38E-02
44	1.12E-01	9.96E-02	9.95E-02
45	1.10E-01	9.91E-02	8.56E-02
46	1.05E-01	9.87E-02	8.20E-02
47	9.63E-02	9.60E-02	7.51E-02
48	8.85E-02	9.24E-02	7.49E-02
49	7.95E-02	8.80E-02	6.77E-02
50	6.92E-02	8.36E-02	6.36E-02
52	6.20E-02	8.09E-02	6.23E-02
53	5.26E-02	7.52E-02	4.99E-02
54	4.67E-02	7.09E-02	4.56E-02
55	4.15E-02	6.54E-02	4.08E-02
56	3.60E-02	6.15E-02	3.55E-02
57	2.80E-02	5.42E-02	2.40E-02
58	2.08E-02	4.30E-02	1.73E-02
59	1.51E-02	3.28E-02	1.58E-02
60	1.02E-02	2.41E-02	9.76E-03

	блок 2					
	Уран			Алюминий		
Ячей ка	SHIEL	LAHET	PARSE-2	SHIELD	LAHET	PARSE-2
1	1.95E-01	1.94E-01	1.55E-01	1.50E-02	5.42E-03	5.86E-03
2	1.95E-01	1.97E-01	1.57E-01	1.45E-02	6.60E-03	6.20E-03
3	1.90E-01	1.97E-01	1.59E-01	1.45E-02	5.91E-03	6.63E-03
4	1.82E-01	1.89E-01	1.53E-01	1.30E-02	6.36E-03	6.61E-03
5	1.68E-01	1.80E-01	1.52E-01	1.12E-02	5.84E-03	5.89E-03
6	1.52E-01	1.68E-01	1.48E-01	1.05E-02	5.67E-03	5.43E-03
7	1.36E-01	1.54E-01	1.47E-01	9.05E-03	5.31E-03	5.37E-03
8	1.22E-01	1.43E-01	1.38E-01	8.73E-03	4.85E-03	4.73E-03
9	1.07E-01	1.28E-01	1.20E-01	7.31E-03	4.32E-03	4.10E-03
10	8.61E-02	1.09E-01	1.15E-01	6.21E-03	4.24E-03	3.43E-03
			блок 1	L		<u></u>
		Уран			Алюминий	
ячей ка	SHIEL	LAHET	PARSE-2	SHIELD	LAHET	PARSE-2
1	1.62E-01	1.58E-01	1.78E-01	1.10E-02	4.59E-03	6.86E-03
2	1.64E-01	1.65E-01	1.86E-01	1.08E-02	4.63E-03	8.18E-03
3	1.62E-01	1.63E-01	2.03E-01	1.04E-02	4.74E-03	1.08E-02
4	1.61E-01	1.61E-01	1.76E-01	1.07E-02	4.57E-03	6.37E-03
5	1.50E-01	1.52E-01	1.75E-01	9.98E-03	4.14E-03	6.17E-0.3
6	1.35E-01	1.43E-01	1.62E-01	9.03E-03	4.36E-03	5.95E-03
7	1.22E-01	1 33E-01	1.61E-01	7 67E-03	3 79E-03	5 80E-03
8	1.09E-01	1 23E-01	1.45E-01	7.57E-03	3 50E-03	5 08E-03
9	9 50E-02	1 11E-01	1.26E-01	7 22E-03	3 43E-03	4 93E-03
10	7 79E-02	9 32E-02	1.14E-01	6 49E-03	2 84E-03	4 90E-03
		3.011 01	блок 1	4	2.012 00	1.502 00
		Уран			Алюминий	
ячей ка	SHIEL	LAHET	PARSE-2	SHIELD	LAHET	PARSE-2
1	9.03E-02	8.67E-02	8.77E-02	5.69E-03	2.18E-03	2.45E-03
2	8.64E-02	8.47E-02	8.85E-02	4.75E-03	2.10E-03	2.20E-0.3
3	8.39E-02	8.38E-02	8.99E-02	4.26E-03	1.74E-03	2.19E-03
4	8.04E-02	8.30E-02	8.94E-02	3.92E-03	1.70E-0.3	2.01E-0.3
5	7.73E-02	7.93E-02	8.46E-02	4.11E-03	1.69E-0.3	2.00E-0.3
6	7 30E - 02	757E-02	7 47E - 02	4 25E - 03	1.78E-03	1 94E - 03
7	6 59E-02	7 03E-02	6.31E-02	3 67E-03	1 64E-03	1 90E-03
8	5 83E-02	6 30E-02	6 13E-02	3 43E-03	1 75E-03	1 88E-03
9	5.05E 02	5 81E-02	5 22E-02	2 80E-03	1 45E-03	1 78E-03
10	4 27E-02	4 95E-02	4 87E-02	2.00E 03	1 11E-03	1.70E 03
10	1.2/1 02	4.951 02	<u>4.071</u> 02 6ποκ 1	3	1.111 05	1.741 05
		Vnaч	UNOR 1	<u> </u>	Δπюминний	
ਰਧੁਠਲਿ	SHIFI.	ланет Танет	PARSE-2	SHIFLD	LAHET	PARSE-2
ка	UIIIII			0111110		
1	6.86E-02	6.51E-02	7.56E-02	4.35E-03	1.82E-03	1.93E-03
2	6.71E-02	6.28E-02	7.89E-02	3.33E-03	1.29E-03	1.91E-03
3	6.21E-02	6.19E-02	7.86E-02	3.43E-03	1.31E-03	1.90E-03
4	6.11E-02	6.08E-02	7.59E-02	3.20E-03	1.19E-03	1.87E-03
5	5.74E-02	5.80E-02	7.01E-02	3.22E-03	1.17E-03	1.84E-03
6	5.48E-02	5.66E-02	6.46E-02	2.99E-03	1.30E-03	1.84E-03
7	5.05E-02	5.31E-02	5.62E-02	2.80E-03	1.11E-03	1.80E-03
8	4.58E-02	4.94E-02	5.29E-02	2.37E-03	1.02E-03	1.76E-03
9	4.04E-02	4.40E-02	4.73E-02	1.96E-03	1.12E-03	1.46E-03
10	3.35E-02	3.78E-02	4.53E-02	1.97E-03	1.33E-03	1.14E-03

Таблица 3 Энерговыделение в урановых блоках бланкета (мэв/см**3/протон)



Рис 6 Распределение энерговыделения в мишени для трех зон по радиусу



Рис 7 Распределение энерговыделения в различных урановых блоках бланкета



Рис 8 Распределение энерговыделения в алюминиевых оболочках различных блоков бланкета

3. Расчет энерговыделения в массивной свинцовой мишени (сборка 1)

В расчете энерговыделения использовалась цилиндризованная модель мишени с эквивалентным радиусом R=28.2 см. Ее расчетная схема представлена на рис 9.



Рис 9 Расчетная модель мишени 1

Эта мишень облучалась пучком протонов с энергией 1.5 Гэв и 5 Гэв.

Плотность пучка протонов была распределена по функции Гаусса с σ=1.6 см.

Ниже представлены результаты расчета по программному комплексу LAHET. В таблице 4 приведены составляющие интегрального энерговыделения. для двух энергий протона. При энергии 1.5 Гэв в мишени выделяется в виде тепловой энергии около 915 Мэв на первоначальный протон (~61%), при энергии 5.0 Гэв – 2860 Мэв (~57%). Обращает на себя внимание малая доля в энерговыделении процессов деления ядер свинца протономи и нейтронами (~2-3%). Рисунках 10,11 дают картину пространственного распределения энергетического "факела" в мишени при энергии протонов 5 Гэв. Видно, что энерговыделение сосредоточено в небольшой области вдоль протонного пучка.

Таблица 4 Интегральные составляющие энерговыделения в мишени при энергии протонов 1.5 и 5.0 Гэв (Мэв/протон).

Источник	LAHET, 1.5	LAHET, 5.0
энерговыделе	Гэв	Гэв
ния		
протоны	563.9	1269.28
фотоны	196.4	941.58
нейтроны	10.0	42.35
π±-мезоны	40.1	275.96
µ±-мезоны	1.1	4.63

Источник	LAHET, 1.5	LAHET, 5.0
Энерговыделе	Гэв	Гэв
ния		
$_1$ H ²	18.3	83.86
$_{1}\text{H}^{3}$	11.5	43.47
$_2\text{He}^3$	2.3	15.48
$_2\text{He}^4$	38.9	99.99
e±	8.0	27.28
ядра отдачи	24.2	53.07
(включая		
деление)		
сумма	914.9	2860.0



Рис 10 Распределение энерговыделения в плоскости, проходящей через ось мишени



Рис 11 Форма "факела" энерговыделения в плоскости, проходящей через ось Z

Детальные значения удельного энерговыделения в ячейках мишени приведены в таблице 5.

№ ячейки	Энергия	Энергия
	протона	протона
	1.5 Гэв	5.0 Гэв
001	0.13620E+01	.43402E+01
002	0.11081E+01	.33934E+01
003	0.84196E+00	.31347E+01
004	0.61663E+00	.26689E+01
005	0.37000E+00	.16839E+01
006	0.16481E+00	.96985E+00
007	0.60642E-01	.49709E+00
008	0.24044E-01	.25521E+00
009	0.54675E+00	.15718E+01
010	0.47777E+00	.14408E+01
011	0.37935E+00	.12548E+01
012	0.29410E+00	.11029E+01
013	0.19193E+00	.78395E+00
014	0.10090E+00	.47542E+00
015	0.45397E-01	.30258E+00

Таблица 5. Удельное энерговыделение в ячейках мишени при энергии протонов 1.5 и 5.0 Гэв (Мэм/протон/см**3).

016	0.18965E-01	.19713E+00
017	0.97822E-01	.25061E+00
018	0.10219E+00	.29941E+00
019	0.91900E-01	.30378E+00
020	0.79644E-01	.24970E+00
021	0.62195E-01	.22548E+00
022	0.41471E-01	.15711E+00
023	0.24721E-01	.10873E+00
024	0.13662E-01	.80189E-01
025	0.35008E-02	.11324E-01
026	0.30495E-02	.15649E-01
027	0.39473E-02	.15573E-01
028	0.64762E-02	.26719E-01
029	0.11679E-01	.25547E-01
030	0.20550E-01	.57905E-01
031	0.23624E-01	.72409E-01
032	0.22433E-01	.75859E-01
033	0.19582E-01	.69636E-01
034	0.15809E-01	.56868E-01
035	0.10602E-01	.43670E-01
036	0.73438E-02	.31067E-01
037	0.40700E-03	.85903E-03
038	0.76948E-03	.19217E-02
039	0.11819E-02	.66975E-02
040	0.22436E-02	.84640E-02
041	0.48283E-02	.10955E-01
042	0.85766E-02	.20855E-01
043	0.10826E-01	.33193E-01
044	0.11194E-01	.35588E-01
045	0.95012E-02	.37714E-01
046	0.74956E-02	.31606E-01
047	0.51114E-02	.24211E-01
048	0.37375E-02	.18325E-01
049	0.22735E-03	.66987E-03
050	0.44678E-03	.14718E-02
051	0.78032E-03	.43135E-02
052	0.13823E-02	.47372E-02
053	0.27970E-02	.62719E-02
054	0.44799E-02	.10985E-01
055	0.60407E-02	.17276E-01
056	0.65896E-02	.20860E-01
057	0.58070E-02	.20106E-01

058	0.45200E-02	.20230E-01
059	0.30495E-02	.14580E-01
060	0.22659E-02	.10744E-01
061	0.18476E-03	.59142E-03
062	0.32949E-03	.13072E-02
063	0.55632E-03	.25922E-02
064	0.10030E-02	.30833E-02
065	0.16921E-02	.40954E-02
066	0.25087E-02	.63084E-02
067	0.33376E-02	.95871E-02
068	0.36199E-02	.12421E-01
069	0.36215E-02	.13322E-01
070	0.27047E-02	.11623E-01
071	0.19269E-02	.91297E-02
072	0.12283E-02	.68898E-02
073	0.13154E-03	.39441E-03
074	0.27411E-03	.11335E-02
075	0.41958E-03	.16804E-02
076	0.69956E-03	.21010E-02
077	0.10463E-02	.27762E-02
078	0.14964E-02	.34786E-02
079	0.18503E-02	.50293E-02
080	0.20270E-02	.68875E-02
081	0.20974E-02	.74305E-02
082	0.16113E-02	.68438E-02
083	0.12181E-02	.54164E-02
084	0.81654E-03	.42503E-02
085	0.95535E-04	.36642E-03
086	0.18192E-03	.77220E-03
087	0.27404E-03	.10185E-02
088	0.41728E-03	.12419E-02
089	0.59525E-03	.15659E-02
090	0.78500E-03	.19470E-02
091	0.94967E-03	.23559E-02
092	0.10452E-02	.33096E-02
093	0.10375E-02	.39262E-02
094	0.87872E-03	.37480E-02
095	0.66802E-03	.30892E-02
096	0.45679E-03	.21486E-02
097	0.48083E-04	.22176E-03
098	0.88703E-04	.35622E-03
099	0.13257E-03	.44914E-03

100	0.18818E-03	.55359E-03
101	0.23516E-03	.65513E-03
102	0.30056E-03	.79969E-03
103	0.35281E-03	.87939E-03
104	0.36570E-03	.10341E-02
105	0.38907E-03	.13332E-02
106	0.35355E-03	.13938E-02
107	0.26400E-03	.11972E-02
108	0.16888E-03	.83558E-03

Представленные выше значения энерговыделения по ячейкам расчетных моделей использовались в программе нестационарного теплового расчета ТЕМП в качестве внешних объемных источников тепла для решения нестационарной задачи по нагреванию мишеней.

Заключение

В работе представлены результаты расчетов энегровыделения в двух мишенных сборках, облучаемых пучком протонов с энергией 1.5 и 5.0 Гэв.(эксперименты в ОИЯИ, г. Дубна). Первая сборка является массивной свинцовой мишенью, набранной из отдельных свинцовых блоков, вторая состоит из свинцового цилиндра, окруженного бланкетом, набранным из урановых стержней.

Для получения достоверных результатов расчеты были проведены как по отечественным программным комплексам SHIELD, PARSE-2, так и по широко известному зарубежному коду LAHET. Сравнительный анализ позволил сделать вывод о том, что интегральные значения энерговыделения определяются с хорошей точность (~5%). Также хорошо определяются и значения в области энергетического "факела". Заметные различия, объясняемые различными моделями переноса фотонов, наблюдаются в периферийных областях мишеней, вклад которых в общее энерговыделение незначителен.

Полученные результаты были использованы для расчетного анализа экспериментов по термометрии мишенных комплексов.

Литература

- 1. В.И. Субботин, А.В. Воронков и др. "Исследование энерговыделения и температурных полей в протяженной мишени при ее облучении пучком релятивистских протонов". Отчет ИПМ им. М.В.Келдыша РАН,1999
- Р.Брандт, С.П. Казновский, М.И.Кривопустов, А.В.Воронков и др "Исследованиетемпературного и нейтронного полей в свинцовой средепри взаимодействии с релятивистскими протонами".Препринт ОИЯИ Р1-99-117, Дубна, 1999 г.
- 3. W.E. Fischer, L. Moritz, H. Spitzer, I.M. Thorson. A calorimetric Measurement of the Heat Deposition in the Vicinity of a Spallation Neutron Target. Nuc. Sci. Eng. v. 93,no 3, p. 273
- 4. В.И. Беляков-Бодин и др. Калориметрические измерения и анализ методом Монте-Карло воздействия пучка протонов промежуточной энергии на мишень из урана. Атомная энергия, т.70, вып.5, 1991
- 5. V.I. Belyakov-Bodin et al. Calorimetric Measurements and Monte-Karlo Analyses of Medium-Energy Protons Bombarding Lead and Bismut Targets, Nucl. Instrum., A295,140,1990
- 6. V.I. Belyakov-Bodin et al. Calorimetric Measurements and Monte-Karlo Analyses of Medium-Energy Protons Bombarding Beryllium, Carbon, and Aluminium Targets, Nucl. Instrum. Methods, A314,508,1992
- Н.М.Соболевский. Программа расчета нуклон-мезонного каскада в веществе методом Монте-Карло. Депонированная публикация ОИЯИ Б1-2-5458, Дубна, 1970.
- 8. Е.В. Ефремов, Н.А. Иванов, О.Б. Москалев. "PARSE-2 комплекс программ для расчетов методом Монте-Карло адронного каскада в трехмерной геометрии". Тезисы докладов VI Всероссийской научной конференции по защите от ИИ ЯТУ, Обнинск, 1998.
- 9. R.E. Prael and H. Lichtenstein, "User Guide to LCS: The LAHET Code System", LANL report LA-UR-89-3014 (September 1989).
- 10.Group-6, "MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport", LA-7396-m Revised, LANL (April 1981)
- 11.A.V.Dementyev, N.M.Sobolevsky. SHIELD Universal Monte Carlo Hadron Transport Code: Scope and Applications. Radiation Measurements, **30** (1999) 553.
- 12.В.С.Барашенков, Н.М.Соболевский, В.Д.Тонеев. Взаимодействие высокоэнергетического излучения с веществом. Атомная Энергия **32** (1972) 123.
- 13.В.С.Барашенков, В.Д.Тонеев. Взаимодействие высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. Атомиздат, М., 1972.
- 14.В.С.Барашенков, А.С.Ильинов, Н.М.Соболевский, В.Д.Тонеев. Взаимодействие частиц и ядер высоких и сверхвысоких энергий с ядрами. УФН, **109** (1973) 91.

- 15.A.S.Botvina, A.V.Dementyev, O.N.Smirnova, N.M.Sobolevsky, V.D.Toneev. MSDM - Multy Stage Dynamical Model. International Codes and Model Intercomparison for Intermediate Energy Activation Yields, by R.Michel and P.Nagel, NSC/DOC(97)-1, NEA/P&T No 14, OECD, Paris, 1997, p.307.
- 16.A.V.Dementyev, N.M.Sobolevsky, Yu.Ya.Stavissky. Neutron Yield from Extended Lead Target under Incident Protons of 0.1 to 100 GeV. Nucl. Instr. Meth. A374 (1996) 70.
- 17.S.F.Sidorkin, A.V.Dementyev, V.G.Miroshnichenko, N.M.Sobolevsky, Yu.Ya.Stavissky, I.I.Konovalov, A.A.Maslov, I.T.Tretyakov, V.I.Trushkin, A.D.Rogov. Pulsed Neutron Source on the Basis of a Uranium Target at the Moscow Meson Factory. Nucl. Instr. Meth. A370 (1996) 467.
- 18.V.G.Semenov, N.M.Sobolevsky. Computer Study of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs Transmutation by Proton Beam. Proc. of Second International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, 3-7 June 1996, Kalmar, Sweden, Ed. H.Conde, Uppsala University. vol 1, p.353. Preprint INR RAS 0933/96, Moscow, 1996.
- 19.E.A.Koptelov, S.G.Lebedev, O.N.Smirnova, N.M.Sobolevsky, Yu.Ya.Stavissky, I.V.Al'tovsky, V.V.Orlov, S.N.Votinov. Prospect for Study of Radiation Damage at RADEX-15, Radiation Experiment Facility, Based on the Beam Stop of Moscow Meson Factory. J.Nucl.Materials 233-237 (1996) 1552.
- 20.A.V.Dementyev, R.A.Nymmik, N.M.Sobolevsky. Secondary Protons and Neutrons Generated by Galactic and Solar Cosmic Ray Particles behind 1-100 g/cm² Aluminium Shielding. Adv. Space Res. **21** (1998) 1793.
- 21.Л.Г.Деденко, А.В.Дементьев, А.А.Кириллов, Т.М.Роганова, Н.М.Соболевский, Г.Ф.Федорова. Генерация нейтронов и радиоактивных нуклидов в адронных каскадах в водных детекторах. Ядерная Физика 59 (1996) 498.
- 22.W.N.Spjeldvik, G.I.Pugacheva, A.A.Gusev, I.M.Martin, and N.M.Sobolevsky. Hydrogen and helium isotope inner radiation belts in the Earth's magnetosphere. Annales Geophysicae, **16** (1998) 931.
- 23.А.В.Богомолов, Р.Бучик, А.В.Дементьев, А.В.Дмитриев, К.Кудела, М.И.Кудрявцев, И.Н.Мягкова, С.П.Рюмин, С.И.Свертилов, Н.М.Соболевский. Потоки и спектры вторичных нейтронов с энергиями >20 МэВ и γ–квантов с энергиями >0,12 МэВ на ИСЗ «КОРОНАС-И», орбитальном комплексе «САЛЮТ-7»-«КОСМОС-1686» и орбитальной станции «МИР». Известия Академии Наук, сер. Физическая, т. 63, №8 (1999) 1660.
- 24.A.Dementyev, V.Gurentsov, O.Ryazhskaya, N.Sobolevsky. Production and Transport of Hadrons Generated in Nuclear Cascades Initiated by Muons in the Rock (Exclusive Approach). Preprint INFN/AE-97/50, Laboratori Nazionali del Gran Sasso, 1997; Nucl. Phys. B (Proc.Suppl.) 70 (1999) 468.
- 25.Л.П.Абагян, Н.О.Базазянц, М.Н.Николаев, А.М.Цибуля. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. Энергоиздат, Москва, 1981.

- 26.Radiation Shielding Information Center, "HETC Monte Carlo High-Energy Nucleon Meson Transport Code", Report CCC-178, ORNL (August 1977)
- 27.H.W.Bertini. Low-Energy Intranuclear Cascade Calculation. Phys. Rev., v.131, No.4, p. 1801-1821.
- 28.H.W.Bertini. Intranuclear-Cascade Calculation of the Secondary Nucleon Spectra from Nucleon-Nucleus Interactions in the Energy Range 340 to 2900 MeV and Comparisons with Experiment. Phys. Rev., v. 188, No. 4, p. 1711-1730.
- 29.F.Atchison, "Spallation and Fission in Heavy Metal Nuclei under Medium Energy Proton Bombardment", in Targets for Neutron Beam Spallation Sources, Jül-Conf-34, Kernforschungsanlage Jülich GmbH (January 1980)
- 30.L.Dresner, "EVAP- A Fortran Program for Calculating the Evaporation of Various Particles from Excited Compound Nuclei", ORNL-TM-196, ORNL (April 1962)
- 31.R.E. Prael and M. Bozoian, "Adaption of the Multistage Preequilibrium Model for the Monte Carlo Method', La-UR-88-3238, LANL (September 1986).
- 32.D. Garber (editor), "ENDF/B-V", Report BNL-17541 (ENDF-201), National Nuclear Data Center, BNL, Upton, N.Y. (October 1975)