

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

А.В. Воронков, Е.В. Ефремов, Е.А. Земсков

РАСЧЕТ ГИБРИДНЫХ ADS СИСТЕМ
(УСКОРИТЕЛЬ + МИШЕНЬ + БЛАНКЕТ)
С РАЗЛИЧНЫМ ОПИСАНИЕМ ИСТОЧНИКА ПЕРВИЧНЫХ НЕЙТРОНОВ

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(код проекта № 03–01–00496)

МОСКВА – 2003

А.В. Воронков, Е.В. Ефремов, Е.А. Земсков

Расчет гибридных ADS систем (ускоритель + мишень + бланкет) с различным описанием источника первичных нейтронов.

В данной работе проведен сравнительный анализ некоторых схем физического расчета гибридных ядерных систем «ускоритель + бланкет + мишень» с использованием программ расчета нуклон-ядерного каскада и переноса нейтронов по программам LANET (США), PARSE-2 (Россия) и реакторной программы MCNP (США). Полные протон-нейтронные расчеты сравниваются с нейтронными реакторными расчетами, в которых задан внешний источник нейтронов, сформированный на основе расчета первичных нейтронов внутри-ядерного каскада (нейтроны “spallation”). Расчеты выполнены для ранее разработанной в ИПМ им. М.В. Келдыша модели подкритической реакторной системы со свинцово-висмутовым теплоносителем и диоксидом урана в качестве топлива.

Показано, что для достижения приемлемой точности (2% - 3%) в расчете такой важной характеристики, как распределение энергосвечения по объему бланкета, источник внешних нейтронов в реакторных программах должен задаваться с верхней границей по энергии до 20 МэВ.

A.V. Voronkov, E.V. Efremov, E.A. Zemskov

Calculation of hybrid ADS systems (accelerator + target + blanket) by using different descriptions of initial neutron source.

In this paper the comparative analysis of some schemes of physical calculation of hybrid nuclear systems «accelerator + blanket + target» with usage of the codes for the nucleon - nuclear cascade calculation and the neutron transport codes LANET (USA), PARSE-2 (Russia) and the reactor code MCNP (USA) is given. The full protons - neutron calculations are compared to the neutron reactor calculations, in which the external neutron source is formed on the basis of calculation of primary neutrons of the intranuclear cascade (“spallation” neutrons). The calculations are fulfilled for the model of sub-critical reactor system with plumbum-bismuthic heat-transfer and with dioxide of uranium as fuel earlier developed in Keldysh Institute of Applied Mathematics.

It is shown that for achievement of acceptable accuracy (2% - 3%) in calculation of such important characteristic, as distribution of energy release over volume of blanket, the source of external neutrons in the reactor codes should be set with high bound on energy up to 20 МэВ.

Ключевые слова: уравнение переноса, метод Монте-карло, гибридные ядерные системы.

Оглавление

Введение	4
1. Расчетная модель ядерной установки со свинцово-висмутовой мишенью и бланкетом со свинцово-висмутовым теплоносителем.	5
2. Спектры и выходы нейтронов в реакциях взаимодействия протонов с материалами установки.	7
3. Сравнительный анализ результатов расчета нейтронно-физических характеристик гибридной ядерной системы по различным схемам задания внешнего источника	9
4. Сравнение энерговыделения в различных схемах расчета	13
Заключение	16
Литература	17

Введение

В настоящее время активно разрабатывается концепция так называемых гибридных ядерных систем (ускоритель – мишень – подкритический бланкет), обладающих внутренне присущей ядерной безопасностью. Эти системы рассматриваются как установки для производства энергии, так и трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов ядерной энергетики. Ведется интенсивная работа по изучению и оптимизации характеристик таких систем. Определяющую роль в этой работе имеет численное моделирование процессов взаимодействия пучка высокоэнергетических протонов с веществом мишени и процессов размножения нейтронов в активной зоне – бланкете установки.

Для расчета физических характеристик таких установок приходится привлекать программы двух классов: для расчета взаимодействия пучка заряженных частиц с веществом мишени – программы расчета нуклон-ядерного каскада (LANET [1], FLUKA [2], PARSE-2 [3], SHIELD [4] и др.), для нейтронно-физического расчета в области энергий до 20 Мэв, включающего в себя расчет кампании бланкета, перегрузок, трансмутации актинидов и долгоживущих осколков деления (реакторные программные комплексы РЕАКТОР-S [5, 6], MCNP [7] и др.).

При организации расчетов часто пользуются поэтапной схемой: на первом этапе решается задача расчета выходов и спектров нейтронов и фотонов из мишени, облучаемой пучком протонов из ускорителя (реакции скалывания или “spallation”), на втором производится расчет подкритической системы мишень-бланкет с заданным внешним источником нейтронов, распределенным в объеме мишени.

Такая декомпозиция общей задачи на два последовательных этапа вносит определенные погрешности в расчет нейтронно-физических характеристик бланкета и всей установки в целом. Одной из причин возникновения погрешностей является неизбежное огрубление спектров нейтронов “spallation”, так как реакторные программы имеют константные библиотеки, охватывающие энергетический диапазон от тепловой области до 10,5 Мэв [8] или до 20 Мэв [9, 10], и, следовательно, часть нейтронов высоких энергий приходится приписывать самой верхней реакторной энергетической группе. Другая причина заключается в том, что источник внешних нейтронов в реакторных программах трудно задать объемным, так как, как правило, программы, используемые на различных этапах расчета, не имеют общего интерфейса. В данной работе проведен сравнительный анализ двух схем расчета системы “бланкет+мишень” по программе MCNP с заданием источника нейтронов “spallation” в энергетическом диапазоне до 10.5 Мэв и 20 Мэв. Расчеты выполнены для ранее разработанной в ИПМ им. М.В. Келдыша модели подкритической реакторной системы со свинцово-висмутовым теплоносителем и диоксидом урана в качестве топлива [11]. В качестве тестовых, полных расчетов для сравнения выполнены комплексные протон-нейтронные расчеты по LANET’у и комплексу программ PARSE-2.

1. Расчетная модель ядерной установки со свинцово-висмутовой мишенью и бланкетом со свинцово-висмутовым теплоносителем.

Рассматриваемая ядерная установка состоит из бланкета, набранного из 144 ТВС. В центре располагается канал мишени, вытесняющий 7 ТВС. Активная зона окружена боковым отражателем из 2 рядов шестигранных стальных пакетов, имеющих такой же размер “под ключ”, как и ТВС активной зоны. Бланкет вместе с отражателем погружен в большой объем сплава свинец-висмут. В качестве топливной композиции используется диоксид урана UO_2 . Для выравнивания распределения мощности по радиусу бланкета применяется трехзонное профилирование обогащением топлива по Урану-235. Расчетная (R-Z) установка приведена на Рис. 1. Ячейки 8 и 15 моделируют протоновод, они заполнены вакуумом.

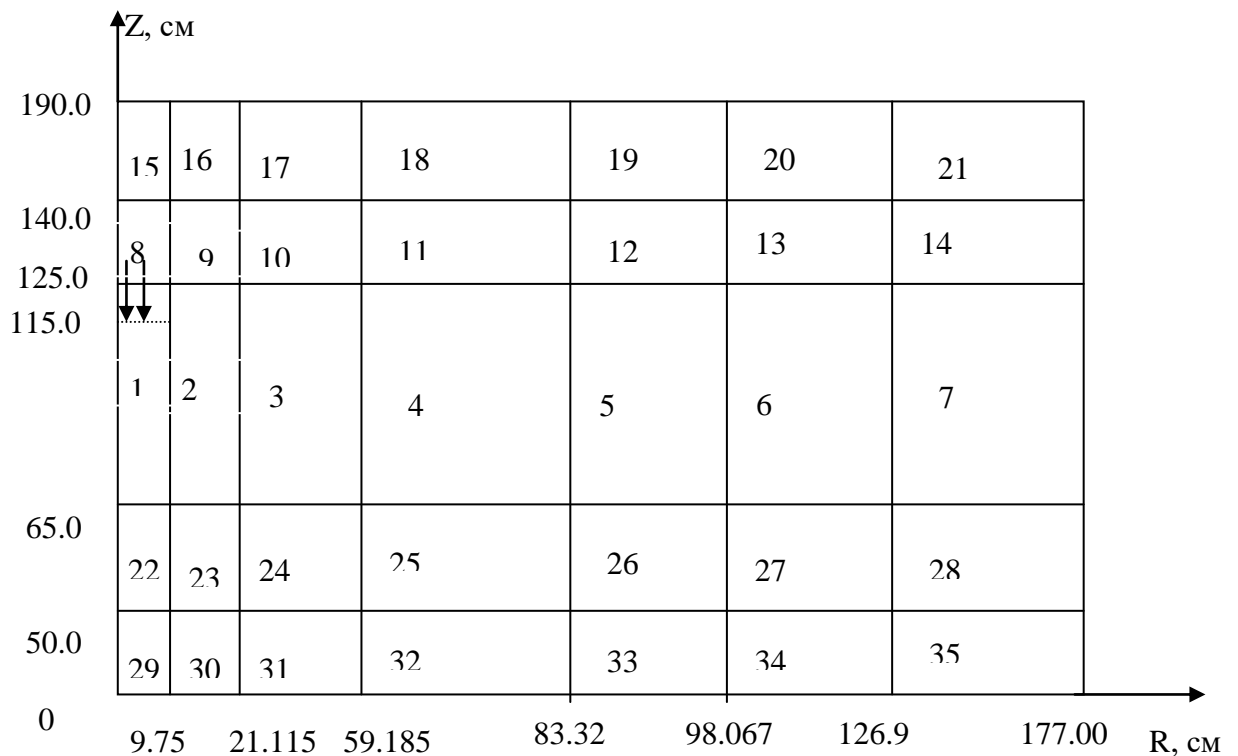


Рис. 1. Геометрия расчетной модели (стрелками показан ввод пучка протонов).

В рассматриваемой модели бланкета принято, что каждая ТВС обрабатывает 4 микрокампании длительностью 1 год с частичными перегрузками. Ядерно-физический состав на начало микрокампании в установившемся режиме перегрузок для топливных зон приведен в Таблице 1, для неразмножающих зон – в Таблице 2.

Таблица 1. Ядерные концентрации нуклидов в активной зоне blankets в начале микрокампании (в ед. 10^{24} яд/см³).

Нуклид	Номер физической зоны blankets на расчетной (R-Z)-модели (Рис.1)					
	3	4	5	10 и 24	11 и 25	12 и 26
U-234	0.9076E-10	0.4939E-10	0.8585E-10	0.4296E-10	0.7698E-10	0.4181E-10
U-235	0.7232E-03	0.7593E-03	0.1232E-02	0.1293E-02	0.1926E-02	0.1998E-02
U-236	0.3708E-04	0.3029E-04	0.5262E-04	0.4171E-04	0.6472E-04	0.5224E-04
U-238	0.7443E-02	0.7493E-02	0.6878E-02	0.6925E-02	0.6178E-02	0.6209E-02
Pu-238	0.3159E-07	0.1710E-07	0.2992E-07	0.1486E-07	0.2688E-07	0.1449E-07
Pu-239	0.1769E-03	0.1411E-03	0.1416E-03	0.1103E-03	0.1002E-03	0.7953E-04
Pu-240	0.4070E-05	0.2688E-05	0.2509E-05	0.1577E-05	0.1514E-05	0.9995E-06
Pu-241	0.6400E-07	0.4319E-07	0.3189E-07	0.2138E-07	0.3251E-07	0.2198E-07
Pu-242	0.7017E-09	0.4241E-09	0.3432E-09	0.2263E-09	0.3020E-09	0.2087E-09
Np-237	0.7142E-06	0.4761E-06	0.8349E-06	0.5241E-06	0.9017E-06	0.5963E-06
Am-241	0.1221E-08	0.8577E-09	0.6552E-09	0.4729E-09	0.6699E-09	0.4857E-09
Оскол. U	0.1593E-03	0.1234E-03	0.2397E-03	0.1805E-03	0.2806E-03	0.2149E-03
Оскол. Pu	0.1491E-04	0.8990E-05	0.1156E-04	0.6563E-05	0.6622E-05	0.3909E-05
O	0.1712E-01					
Fe	0.1348E-01					
Cr	0.1844E-02					
Ni	0.9654E-04					
Mo	0.6815E-04					
Pb	0.5438E-02					
Bi	0.6674E-02					

Таблица 2. Ядерные концентрации нуклидов в не размножающих областях (в ед. 10^{24} яд/см³).

Нуклид	Физическая зона на расчетной (R-Z)-модели (Рис.1)		
	9,16,22,23,29,30	6,13,27	17-21, 31-35,14,7,28
FE	0.6119E-02	0.5959E-01	-
CR	0.1373E-02	0.1337E-01	-
NI	0.7297E-03	0.7107E-02	-
PB	0.1188E-01	0.3445E-03	0.1320E-01
BI	0.1458E-01	0.4228E-03	0.1620E-01

Расчеты выполнены для двух энергий: 800 и 1500 Мэв. Пучок вводится перпендикулярно плоскости Z=115 (ячейка 8). В расчете при энергии протона 800 Мэв пучок распределен по двумерной функции Гаусса с $\sigma=1.5$ см, при энергии протона 1500 Мэв - равномерно в круге с радиусом $r=9.75$ см.

2. Спектры и выходы нейтронов в реакциях взаимодействия протонов с материалами установки.

Несмотря на “узость” входного пучка протонов, производство первичных нейтронов за счет реакций внутриядерного каскада, предравновесного состояния и стадии испарения ядра происходит в области, значительно более обширной, чем мишень. Выходы первичных нейтронов по ячейкам расчетной модели для двух энергий протонов представлены в Таблице 3, расчет произведен по программному комплексу LANET.

Таблица 3. Выходы нейтронов “spallation” по ячейкам расчетной модели.

Номер ячейки	Выход нейтронов на протон с энергией 800 МэВ	Выход нейтронов на протон с энергией 1500 МэВ
1	1.710E+01	2.889E+01
2	2.472E+00	7.675E+00
3	1.902E+00	4.285E+00
4	1.501E-01	3.469E-01
5	2.628E-02	6.965E-02
6	1.122E-02	2.747E-02
7	4.450E-03	1.148E-02
8	0.000E+00	0.000E+00
9	2.559E-02	2.899E-02
10	4.379E-02	9.148E-02
11	8.329E-03	1.912E-02
12	1.410E-03	5.040E-03
13	1.020E-03	2.650E-03
14	4.200E-04	1.080E-03
15	0.000E+00	0.000E+00
16	1.827E-02	1.132E-02
17	2.508E-02	4.323E-02
18	7.570E-03	1.419E-02
19	2.250E-03	5.530E-03
20	1.880E-03	5.210E-03
21	6.600E-04	1.580E-03
22	4.958E-01	2.559E+00
23	4.858E-01	1.884E+00
24	6.028E-01	1.466E+00
25	6.116E-02	1.453E-01
26	1.040E-02	2.986E-02
27	4.950E-03	1.111E-02
28	1.840E-03	4.410E-03
29	1.389E-01	1.581E+00
30	3.200E-01	1.811E+00
31	7.393E-01	2.300E+00
32	1.331E-01	3.469E-01
33	3.275E-02	8.105E-02
34	2.327E-02	6.165E-02
35	6.660E-03	1.889E-02
сумма	2.486E+01	5.380E+01

В зоне мишени (ячейки 1, 2, 22, 23, 29, 30) рождается около 82% и 85% нейтронов при энергии протона 800 МэВ и 1500 МэВ соответственно. Около 12% и 11% нейтронов образуются в активной зоне (ячейки 3, 4, 5, 10, 11, 12, 24, 25, 26), остальные 4% и 6% в зонах отражателя. Таким образом, видно, что источник нейтронов “spallation” сосредоточен не только в области мишени. Значительная его часть приходится на бланкет и отражатель. Эти составляющие источника нейтронов имеют и различные энергетические распределения. На Рис. 2 и 3 приведены графики спектров нейтронов “spallation” для трех характерных ячеек при энергии протона 800 и 1500 МэВ.

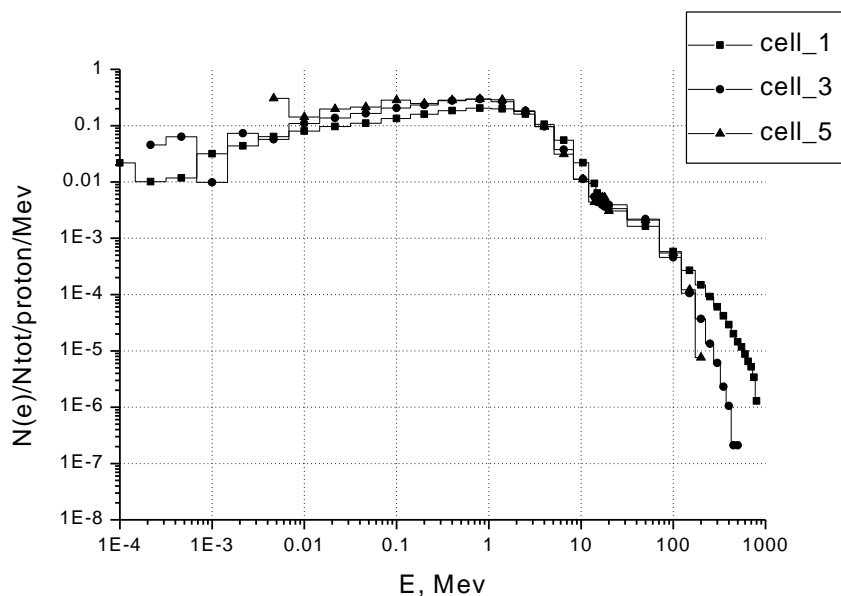


Рис. 2. Энергетический спектр нейтронов “spallation” в ячейках 1,3,5 (энергия протона 800 МэВ).

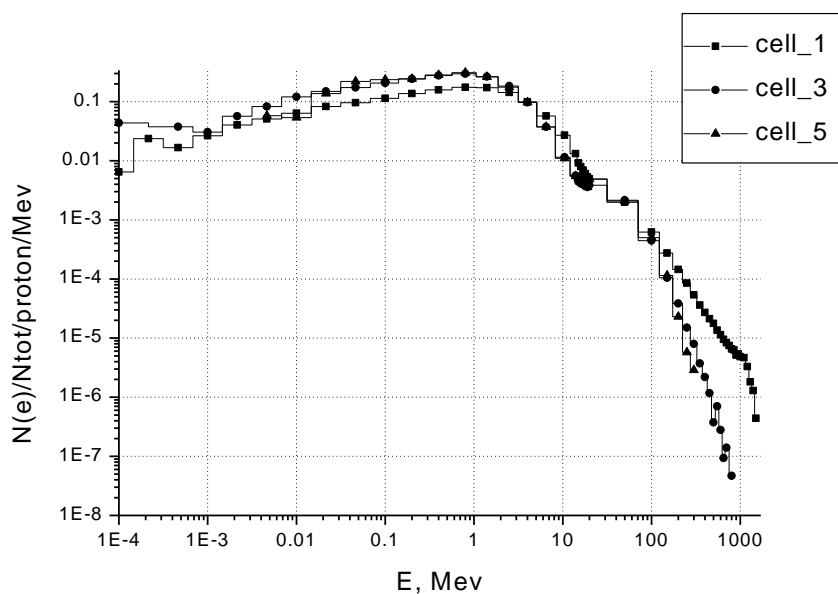


Рис. 3. Энергетический спектр нейтронов “spallation” в ячейках 1,3,5 (энергия протона 1500 МэВ).

Спектр нейтронов в области мишени смещен по сравнению с бланкетом в быструю область. Об этом можно судить по данным Таблицы 4, в которой приведены доли “быстрых” (нереакторных) нейтронов.

Таблица 4. Доля нейтронов “spallation” с энергией, большей 10.5 МэВ и 20 МэВ.

Номер ячейки	Энергия протонов 800 МэВ				Энергия протонов 1500 МэВ			
	Доля нейтронов с энергией >10.5 МэВ, %		Доля нейтронов с энергией >20 МэВ, %		Доля нейтронов с энергией >10.5 МэВ, %		Доля нейтронов с энергией >20 МэВ, %	
	LANET	PARSE	LANET	PARSE	LANET	PARSE	LANET	PARSE
1	17.2	18.3	11.2	13.5	21.5	21.3	12.9	14.0
3	14.1	14.9	9.7	10.83	13.9	14.6	9.5	9.8
5	14.0	13.0	9.7	10.2	13.8	14.2	9.5	9.6
В целом по установке	16.33	16.20	10.81	11.05	19.03	19.45	11.6	12.1

При расчетах установки мишень+бланкет по реакторным программам в качестве внешнего источника нейтронов берутся нейтроны “spallation”. При этом, как правило, приходится огрублять этот источник: а) задавать источник только в области мишени, б) долю нейтронов с “нереакторными” энергиями приписывать верхней энергетической группе. Оба эти шага вносят в нейтронно-физический расчет всей установки в целом определенные погрешности.

3. Сравнительный анализ результатов расчета нейтронно-физических характеристик гибридной ядерной системы по различным схемам задания внешнего источника

Для определения погрешностей, вносимых в расчет нейтронно-физических характеристик бланкета по реакторным программам с заданием внешнего источника, проведен сравнительный анализ трех расчетов для двух энергий протона 800МэВ и 1500МэВ:

- Полный расчет всей установки по программному комплексу метода Монте-Карло LANET. Для расчета переноса нейтронов в области энергий >20 МэВ в этом случае выбрана хорошо зарекомендовавшая себя модель Бертини [12], ниже 20 МэВ выполняется детальный расчет по сечениям с непрерывной зависимостью от энергии по программе HMCNP, являющейся составной частью комплекса LANET.
- Расчет по программе MCNP с заданием внешнего источника нейтронов, полученного из источника нейтронов “spallation” с преобразованием спектра в 34-групповой вид с диапазоном энергий 0÷20 МэВ (расширенный диапазон реакторных программ). Источник распределен равномерно в области мишени (ячейка 1).

- Расчет по программе MCNP с заданием внешнего источника нейтронов, спектр которых преобразован в 27-групповой вид с диапазоном энергий 0÷10.5 МэВ (обычный диапазон реакторных программ). Источник распределен равномерно в области мишени (ячейка 1).

Численные значения спектров внешнего источника, нормированных на единицу, приведены в Таблице 5.

Таблица 5. Нормированные спектры нейтронов внешнего источника.

Номер группы	Энергия верхней границы группы	Спектр нейтронов с энергией до 20 МэВ, $N^{(j)}/N_{tot}$	Спектр нейтронов с энергией до 10.5 МэВ, $N^{(j)}/N_{tot}$
1	2.53000E-08	0.000000E+00	0.000000E+00
2	2.15400E-07	0.000000E+00	0.000000E+00
3	4.64200E-07	0.000000E+00	0.000000E+00
4	1.00000E-06	0.000000E+00	0.000000E+00
5	2.15400E-06	0.000000E+00	0.000000E+00
6	4.64200E-06	0.000000E+00	0.000000E+00
7	1.00000E-05	0.000000E+00	0.000000E+00
8	2.15400E-05	0.000000E+00	0.000000E+00
9	4.64200E-05	0.000000E+00	0.000000E+00
10	1.00000E-04	8.044347E-07	8.044363E-07
11	2.15400E-04	1.206652E-06	1.206655E-06
12	4.64200E-04	4.022174E-06	4.022182E-06
13	1.00000E-03	1.769756E-05	1.769760E-05
14	2.15400E-03	5.993039E-05	5.993051E-05
15	4.64200E-03	1.906108E-04	1.906112E-04
16	1.00000E-02	5.192626E-04	5.192637E-04
17	2.15400E-02	1.326915E-03	1.326918E-03
18	4.64200E-02	3.274452E-03	3.274458E-03
19	1.00000E-01	8.362099E-03	8.362116E-03
20	2.00000E-01	1.838536E-02	1.838539E-02
21	4.00000E-01	4.235349E-02	4.235357E-02
22	8.00000E-01	9.178600E-02	9.178619E-02
23	1.40000E+00	1.299564E-01	1.299567E-01
24	2.50000E+00	1.840949E-01	1.840953E-01
25	4.00000E+00	1.546526E-01	1.546529E-01
26	6.50000E+00	1.258136E-01	1.258138E-01
27	1.05000E+01	7.585819E-02	2.391991E-01
28	1.39800E+01	2.877463E-02	
29	1.50200E+01	6.029238E-03	
30	1.60000E+01	4.870852E-03	
31	1.70000E+01	4.456568E-03	
32	1.80000E+01	4.000052E-03	
33	1.90000E+01	3.628001E-03	
34	2.00000E+01	1.115831E-01	

Расчеты по программному комплексу ЛАНЕТ позволяют иметь детальную численную картину по физическим процессам, связанным с переносом нейтронов в расчетной модели ядерной установки. При этом

нейтронные физические процессы для энергий >20 Мэв моделируются методами нуклон-ядерного каскада (нуклон-нуклонные взаимодействия, внутриядерный каскад, предравновесное состояние, фаза испарения ядра), для энергий < 20 Мэв осуществляется расчет уравнения переноса методом Монте-Карло с использованием детальных библиотек сечений.

Эти полные расчеты позволяют получить полезные для дальнейшего анализа интегральные величины по объему установки в расчете на один протон источника протонов. Процессы рождения нейтронов во всем диапазоне энергий описываются числом нейтронов деления, числом нейтронов за счет реакций (n, xn) , числом вторичных нейтронов за счет внутриядерного каскада; процессы гибели нейтронов - потерями в реакциях деления, (n, xn) , поглощения и утечки, потерями в процессах множественного рождения нейтронов при энергиях >20 Мэв.

На основе этих данных можно рассчитать необходимые для сравнения величины:

- коэффициент мультипликации подкритического blankets K_s , равный отношению числа рождающихся нейтронов к общим потерям нейтронов в расчете на один протон,
- коэффициент умножения нейтронов в blankets M , определяемый выражением:

$$M = \frac{K_s}{1 - K_s},$$

- относительную ценность нейтронов источника “spallation” φ^* , определяемую выражением:

$$\varphi^* = \left(\frac{1}{K_{eff}} - 1 \right) / \left(\frac{1}{K_s} - 1 \right),$$

где K_{eff} - обычный коэффициент размножения, определяемый в квазикритическом расчете подкритической системы. В нашем случае $K_{eff} = 0.97162$.

- эффективное число нейтронов на один протон можно получить, рассчитав общее число нейтронов “spallation” N_{sp} и используя их ценность:

$$N_{eff} = N_{sp} \cdot \varphi^*,$$

что позволит иметь для сравнения величины, нормированные на один нейтрон.

Расчеты по реакторным программам с диапазонами энергий до 10.5 Мэв и до 20 Мэв также позволяют получить составляющие нейтронного баланса в расчете на один нейтрон источника. Сравнение этих величин позволяет оценить погрешности реакторного расчета, использующего задание внешнего источника нейтронов, моделирующего источник нейтронов “spallation”.

Необходимые величины для сравнительного анализа из полных расчетов по комплексу ЛАНЕТ для двух энергий протона приведены в Таблице 6.

Таблица 6. Составляющие баланса нейтронов в полных расчетах по ЛАНЕТ.

Процесс	$E_{\text{прот}}=800$ МэВ		$E_{\text{прот}}=1500$ МэВ	
	Нормировка на 1 протон	Нормировка на 1 эффект. нейтрон	Нормировка на 1 протон	Нормировка на 1 эффект. нейтрон
Рождение $\langle \nu \Sigma_f \rangle$	513.66	26.674	1069.800	26.131
Рождение $\langle (n, xn) \rangle$ для энергий $E_{\text{нейт}} < 20$ МэВ	4.705	0.214	11.339	0.277
Рождение $\langle (n, xn) \rangle$ для энергий $E_{\text{нейт}} > 20$ МэВ	3.283	0.170	7.585	0.185
Рождение, внутриядерный каскад	1.907	0.099	4.355	0.107
Потери $\langle \Sigma_f \rangle$ для $E_{\text{нейт}} < 20$ МэВ	203.77	10.582	424.400	10.366
Потери $\langle (n, xn) \rangle$ для $E_{\text{нейт}} < 20$ МэВ	2.313	0.120	5.564	0.136
Потери $\langle \Sigma_{\text{сар}} \rangle$ для $E_{\text{нейт}} < 20$ МэВ	270.230	14.033	563.020	13.752
Потери на утечку, $E_{\text{нейт}} < 20$ МэВ	64.295	3.339	135.830	3.318
Общие потери в реакциях с $E_{\text{нейт}} > 20$ МэВ	2.688	0.140	6.221	0.152
K_s	0.96366		0.96303	
K_{eff}	0.97162			
$N_{\text{сп}}$	24.860		53.800	
ϕ^*	0.77462		0.76097	
N_{eff}	19.257		40.940	
M	26.5199		26.0525	

Аналогичные величины для расчетов с заданным источником нейтронов с верхней границей по энергии 10.5 МэВ и 20 МэВ представлены в Таблице 7. Все величины в этой таблице нормированы на 1 нейтрон источника.

Таблица 7. Составляющие баланса нейтронов в реакторных расчетах.

Процесс	$E_{\text{прот}}=800$ МэВ		$E_{\text{прот}}=1500$ МэВ	
	Источник с энергией < 10.5 МэВ	Источник с энергией < 20 МэВ	Источник с энергией < 10.5 МэВ	Источник с энергией < 20 МэВ
Рождение $\langle \nu \Sigma_f \rangle$	23.260	26.191	22.377	26.390
Рождение $\langle (n, xn) \rangle$	0.188	0.443	0.201	0.498
Потери $\langle \Sigma_f \rangle$	9.225	10.388	8.880	10.467
Потери $\langle (n, xn) \rangle$	0.094	0.204	0.100	0.229
Потери $\langle \Sigma_{\text{сар}} \rangle$	12.256	13.797	11.817	13.920
Потери на утечку	2.877	3.244	2.775	3.266
K_s	0.95895	0.96384	0.95786	0.96434
M	23.605	26.685	22.967	27.042

Из данных Таблиц 6 и 7 видно, что реакторные расчеты, выполненные со сдвигом спектра нейтронов источника “spallation” за границу энергий 20 МэВ, довольно хорошо совпадают по интегральным величинам с полными базовыми расчетами от “протона”. Так расхождение в K_s составляет 0.02% для энергии протона 800 МэВ и 0.14% для 1500 МэВ. Баланс нейтронов довольно близок к базовому расчету: реакции деления, захвата, утечка нейтронов совпадают с точностью 1.5%, реакции (n,xn) завышаются на 7%, но зато отсутствует реакция рождения нейтронов во внутриядерном каскаде. В итоге коэффициенты умножения нейтронов в бланкете М, напрямую связанные с энергетическим выигрышем, отличаются от базовых на 0.62% и 3.80%.

Результаты расчета со сдвигом спектра нейтронов источника за энергетическую границу 10.5 МэВ существенно отличается от результатов базовых расчетов. Так, недооценка K_s составляет 0.49% для энергии протона 800 МэВ и 0.53% - для 1500 МэВ. Коэффициент умножения М недооценивается на 12.35% и 13.43% соответственно.

Основная причина – недооценка реакций (n,xn), которые имеют максимальные сечения именно в диапазоне энергий от 10 и более МэВ. Это наглядно видно в Таблице 8, в которой значения K_s , полученные для различных схем расчета, разделены на составляющие по делению и реакциям (n,xn), равные отношениям рожденных нейтронов в реакциях деления и (n,xn) к общим потерям нейтронов. Отличия в доли (n,xn) реакций достигают 2.4 раза.

Таблица 8. Составляющие K_s

E _{прот} =800 МэВ		
	ΔK_s (деление)	ΔK_s (n,xn)
1. E _{нейт} <10.5 МэВ	0.95125	0.00770
2. E _{нейт} <20 МэВ	0.94782	0.01602
3. Базовый расчет	0.94545	0.01821
E _{прот} =1500 МэВ		
1. E _{нейт} <10.5 МэВ	0.94934	0.00852
2. E _{нейт} <20 МэВ	0.94649	0.01784
3. Базовый расчет	0.94253	0.02050

4. Сравнение энерговыделения в различных схемах расчета.

Расчет энерговыделения в гибридных ядерных системах очень чувствителен к уровню подкритичности установки и связан с точностью определения коэффициента умножения бланкета М. Ниже проведен сравнительный анализ результатов расчета энерговыделения в базовых расчетах по программам LANET и PARSE-2 и в реакторных расчетах по

программе MCNP с различными схемами задания внешнего источника нейтронов “spallation”. Во всех расчетах для сравнения бралось энерговыделение только от нейтронных реакций.

В расчетах по комплексу LANET и PARSE-2 значение энерговыделения нормировано на 1 протон. Для сравнения с реакторными расчетами, в которых источник внешних нейтронов задается равномерным в зоне мишени, эту величину необходимо отнормировать на 1 эффективный нейтрон, воспользовавшись определением ценности нейтронов источника “spallation”.

В Таблице 9 приведены расчетные интегральные по объему blankets данные на 1 протон, там же приведен коэффициент выигрыша по энергии G, равный отношению мощности blankets к мощности пучка протонов.

Таблица 9. Интегральные по объему значения энерговыделения в базовых расчетах, нормировка на один протон.

Энергия протона, МэВ	LANET		PARSE-2	
	Энерговыделение, МэВ/протон	G	Энерговыделение, МэВ/протон	G
800	35146.10	43.93	37640.00	47.05
1500	73216.87	48.81	69700.00	46.46

В Таблице 10 приведены для базовых и реакторных расчетов значения энерговыделения Q, нормированные на один нейтрон, отклонения реакторных величин от базовых. Там же для сравнения приведены соответствующие значения коэффициента умножения нейтронов blanketsом.

Таблица 10. Значения энерговыделения, нормированные на один нейтрон.

	Q, МэВ/нейтрон	$\left(\frac{Q_{баз}}{Q} - 1\right)$, %	M	$\left(\frac{M_{баз}}{M} - 1\right)$, %
Энергия протона 800 МэВ				
Базовый расчет, LANET	1825.10	-	26.520	-
Реакторный расчет, E<10.5 МэВ	1588.13	14.92	23.605	12.35
Реакторный расчет, E<20 МэВ	1789.52	1.99	26.655	-0.500
Энергия протона 1500 МэВ				
Базовый расчет, LANET	1788.39	-	26.0-53	
Реакторный расчет, E<10.5 МэВ	1531.0	16.81	22.967	13.43
Реакторный расчет, E<20 МэВ	1804.71	-0.010	27.042	-3.66

Из данных Таблицы 10 видно, что точность схемы реакторного расчета со сдвигом спектра источника нейтронов за границу 10.5 МэВ при

определении энерговыделения существенно меньше, чем схемы со сдвигом спектра за 20 МэВ. Последняя схема имеет вполне допустимые расхождения с полными базовыми расчетами.

В Таблице 11 приведены значения энерговыделения по расчетным областям активной зоны - blankets. Локальные расхождения реакторных расчетов со сдвигом верхней границы спектра источника нейтронов до 10.5 МэВ составляют 13-19%, расхождения в схеме расчета со спектром до 20 МэВ не превышают 1-3%.

Таблица 11. Значения энерговыделения по ячейкам blankets.

Номер ячейки	Реакторный расчет, $E_s < 10.5 \text{ МэВ}$, МэВ/(см ³ ·нейтрон)	Реакторный расчет, $E_s < 20 \text{ МэВ}$, МэВ/(см ³ ·нейтрон)	Базовый расчет, LANET, МэВ/(см ³ ·нейтрон)
Энергия протона 800 МэВ			
3	5.9438-04	6.6783-04	6.7452-04
4	6.7544-04	7.6257-04	7.7816-04
5	7.2657-04	8.2003-04	8.4023-04
10	4.0583-04	4.5467-04	4.6939-04
11	5.0140-04	5.6402-04	5.7714-04
12	5.6204-04	6.3113-04	6.4673-04
24	4.7857-04	5.3761-04	5.3594-04
25	5.3229-04	5.9955-04	6.1294-04
26	5.8013-04	6.5733-04	6.7352-04
Энергия протона 1500 МэВ			
3	5.7493-04	6.7649-04	6.5684-04
4	6.5089-04	7.6737-04	7.6312-04
5	6.9971-04	8.2611-04	8.2174-04
10	3.9052-04	4.5713-04	4.4786-04
11	4.8085-04	5.6564-04	5.5950-04
12	5.3911-04	6.3595-04	6.2755-04
24	4.6196-04	5.4579-04	5.4759-04
25	5.1317-04	6.0566-04	6.1077-04
26	5.6092-04	6.6232-04	6.6639-04

В Таблице 12 приведены для сравнения результаты расчета энерговыделения по расчетным областям blankets по программам полного моделирования процессов переноса заряженных и нейтральных частиц LANET и PARSE-2. В расчете по программе LANET для энергии протона 800 МэВ использовалось распределение пучка протонов по Гауссу с $\sigma=1.5$ см., для энергии протона 1500 МэВ равномерное распределение пучка в круге радиусом 9.75 см. В расчете по программе PARSE-2 оба расчета выполнены с равномерным распределением пучка протонов в круге с радиусом 9.75 см. Основной источник расхождений в значении энерговыделения при 800 МэВ заключается в различном способе ввода пучка нейтронов. Расхождения в сопоставимых результатах при 1500 МэВ в среднем составляют ~10%, максимальные достигают 27%. Основная причина таких расхождений - использование различных библиотек нейтронных сечений.

Таблица 12. Энерговыведение, рассчитанное по программам LANET и PARSE-2.

Номер ячейки	Энергия протона 800 Мэв		Энергия протона 1500 Мэв	
	Энерговывед., Мэв/(см ³ ·прот.), LANET	Энерговывед., Мэв/(см ³ ·прот.), PARSE-2	Энерговывед., Мэв/(см ³ ·прот.), LANET	Энерговывед., Мэв/(см ³ ·прот.), PARSE-2
3	1.2967-02	2.773-02	2.6891-02	2.541-02
4	1.4985-02	9.666-03	3.1242-02	2.734-02
5	1.6180-02	1.098-02	3.3642-02	3.046-02
10	9.0313-03	1.033-02	1.8335-02	1.691-02
11	1.1099-02	1.009-02	2.2906-02	1.800-02
12	1.2454-02	9.956-03	2.5692-02	2.530-02
24	1.0321-02	1.202-02	2.2419-02	2.657-02
25	1.1803-02	1.128-02	2.5005-02	2.287-02
26	1.2970-02	1.094-02	2.7282-02	3.281-02

Заключение

Из сравнительного анализа результатов расчета физических характеристик на примере гибридной ядерной системы с свинцово-висмутовым теплоносителем следует:

- Для достижения приемлемой точности (2%-3%) в расчете такой важной характеристики, как распределение энерговыведения по объему blankets, по реакторным программам источник внешних нейтронов, формируемый из источника первичных нейтронов “spallation” за счет внутриядерного каскада, должен задаваться по энергии до 20 Мэв. Использование реакторных расчетов с верхней границей по энергии 10.5 Мэв вносит существенные ошибки (14%-17%) в значение интегрального по объему энерговыведения.
- Введение функции ценности нейтронов источника “spallation” и их эффективного числа позволяет в значительной степени устранить неточности в реакторном расчете, связанные с тем, что внешний источник нейтронов задается равномерно распределенным в зоне мишени.

Литература

1. R.E. Prael and H. Lichtenstein. "User Guide to LCS: The LAHET Code System", LANL report LA-UR-89-3014 (September 1989).
2. Ranft J., Routii J.T. "Monte Carlo programs for calculating three-dimensional high energy (50 Mev – 500 Gev) hadron Cascades in Matter", Comput. Phys. Commun., 1974, v. 7, p. 327.
3. Ефремов Е.В., Иванов Н.А., Москалев О.Б. "PARSE-2 комплекс программ для расчета методом Монте-Карло адронного каскада в трехмерной геометрии", Тезисы докладов VI Всероссийской научной конференции по защите от ИИ ЯТУ, Обнинск, 1998.
4. A.V.Dementyev, N.M.Sobolevsky. "SHIELD - Universal Monte Carlo Hadron Transport Code: Scope and Applications. Radiation Measurements", **30** (1999) 553.
5. A.V.Voronkov, V.I.Arzhanov. "REACTOR - program system for neutron-physical calculations", Proc. International topical meeting, Advances in Mathematics, Computational and Reactor Physics, Pittsburg, USA, 1991.
6. Воронков А.В., Земсков Е.А., Новикова Н.Н., Сычугова Е.П. "Расчет по программному комплексу REACTOR-S теста для гибридных ядерных систем IAEA-ADS benchmark", Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН №77, 2000.
7. Group-6, "MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport", LA-7396-m Revised, LANL (April 1981).
8. Абагян Л.П., Базазянц Н.О., Бондаренко И.И., Николаев М.Н. "Групповые константы для расчета ядерных реакторов", М.: Атомиздат, 1964.
9. Мантуров Г.Н., Николаев М.Н., Цибуля А.М. "Система групповых констант БНАБ-93", ВАНТ, серия "Ядерные константы", вып. 1, 1996.
10. Воронков А.В., Сеница В.В. "GNPDL-30/19: библиотека нейтронно-фотонных групповых констант для расчета подкритических систем с внешней подсветкой", Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 25, 2001.
11. Воронков А.В., Земсков Е.А., Новикова Н.Н. "Расчетный анализ физических характеристик гибридных ядерных систем с различным типом blankets", Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 45, 2001.
12. 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.