

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

**Воронков А.В., Земсков Е.А., Новикова Н.Н.**

**РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ГИБРИДНЫХ ЯДЕРНЫХ СИСТЕМ С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ  
БЛАНКЕТА**

МОСКВА-2001

## **АННОТАЦИЯ**

В работе приведены результаты комплексных расчетов двух разработанных авторами моделей энергетических гибридных ядерных систем - аналогов быстрых реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем: сплавом свинец-висмут и натрием.

Расчетным путем получены многие физические характеристики, такие как выход нейтронов “скальвания” в мишени, их спектры, коэффициент умножения нейтронов в blankets, требуемая мощность нейтронного источника, требуемая сила тока в пучке протонов для достижения заданной мощности и др.

Расчеты проведены с использованием комплекса LANET и пакета программ REACTOR.

Проведенные расчетные исследования позволили сделать сравнительный анализ, имеющий значение для дальнейшего изучения и оптимизации предложенных гибридных ядерных систем.

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

Voronkov A.V., Zemskov E.A., Novikova N.N.

## **CALCULATION ANALYSIS FOR PHYSICAL CHARACTERISTICS OF HYBRID SYSTEMS WITH DIFFERENT BLANKET TYPES.**

### **ABSTRACT**

This work provides the results of complex calculations for two elaborated by the authors models of hybrid energetic systems – analogs of the fast reactors with liquid-metallic coolant: alloy of lead-bismuth and sodium.

By these calculations many of the physical characteristics were obtained, such as output of “splitting” neutrons in the target, their spectrums, coefficient of multiplying of neutrons in the blanket, the required power for the source of neutrons, the required current force in the beam of protons for given power etc.

The calculations were made with the use of the complex LANET and the program package REACTOR.

The calculations, which were carried out, enabled us to make a comparing analysis which would be important for further researches and optimization of proposed hybrid nuclear systems.

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

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Эффективность мишеней, спектры нейтронов “скалывания ”	5
2. Бланкет для подкритической системы со свинцово-висмутовым теплоносителем	8
2.1. Краткое описание конструкции blankets	8
2.2. Определение ядерно-физического состава и расчет физических характеристик blankets со свинцово-висмутовым теплоносителем в установившемся режиме	11
3. Бланкет для подкритической системы с натриевым теплоносителем	17
3.1. Расчет ядерно-физического состава blankets в установившемся режиме	18
4. Сравнение рассмотренных гибридных ядерных систем по величине тока и мощности пучка протонов	28
Заключение	30
Литература	32

## Введение

Одной из перспективных концепций в стратегии развития атомной энергетики является концепция гибридных ядерных систем (ускоритель-мишень-бланкет). О широком научном интересе к таким установкам свидетельствуют труды ряда международных конференций [1-3 и др.] и поток публикаций в научных журналах.

В настоящее время идет интенсивная работа по изучению и оптимизации физических характеристик таких систем, рассматриваются различные варианты установок, различающихся по целевому назначению, виду ядерного топлива и мишенных материалов, виду теплоносителя и замедлителя, спектру нейтронов, топливному циклу, конструктивному исполнению.

В данном препринте представлены разработанные авторами модели двух подкритических реакторных систем, управляемых пучком релятивистских протонов от ускорителя. Рассмотрены энергетические установки для производства энергии мощностью по 500 Мвт (тепловой). Их конструкции основаны на уже известных и хорошо зарекомендовавших себя в традиционной реакторной практике технических решениях.

Первая установка представляет собой гибридную систему, включающую в себя свинцово-висмутовую мишень и бланкет, в качестве основного элемента конструкции которого взята тепловыделяющая сборка (ТВС), характерная для реакторов с теплоносителем свинец-висмут [4,5] и подробно описанная в работе [6].

Вторая ядерная установка состоит из вольфрамовой мишени (сплошной и разделенной), охлаждаемой натрием и бланкета, также охлаждаемого натрием, собранного из ТВС, конструкция которых характерных для проекта реактора БН-800 [7,8].

Для обеих конструкций рассмотрено использование двух видов ядерного топлива: а) нитрид урана UN, б) диоксид урана  $UO_2$ .

Выполнен сравнительный расчетный анализа физических характеристик для этих установок как по типу топлива, так и по энергии протонов.

Схема расчета гибридных ядерных систем, используемая в данной работе, включает в себя два этапа. На первом этапе определяется источник нейтронов, который нарабатывается в реакциях взаимодействия пучка протонов с веществом мишени (нейтроны “скалывания”-“spallation”). Для этой цели используется широко известный программный комплекс LANET (LCS) [9], позволяющий рассчитывать многие физические характеристики мишени, в том числе выход и спектр нейтронов “скалывания”. На втором этапе процессы переноса нейтронов “скалывания” в объеме всей установки,

играющие уже роль источника внешних нейтронов, рассчитываются по программному комплексу RACTOR [10].

### 1. Эффективность мишеней, спектры нейтронов “скальвания”.

Назначение мишеней, облучаемых пучком высокоэнергетических протонов (обычно рассматривают протоны с энергией 600 – 1500 МэВ) состоит в наработке в своем объеме нейтронов “скальвания”. Иногда их называют нейтронами расщепления. Под этими терминами понимают родившиеся нейтроны в реакциях внутриядерного каскада, включающие в себя прямые нуклон-нуклонные реакции, фрагментацию ядра, высокоэнергетическое деление, фазу “испарения” возбужденного компаунд-ядра [11].

Максимум производства нейтронов “скальвания” достигается на тяжелых элементах. В качестве материалов для мишеней, в которых можно получить значительный поток нейтронов, рассматриваются свинец, сплав свинца-висмута, ртуть, вольфрам, тантал и др.

Для расчетного анализа гибридных ядерных систем, рассматриваемых в данной работе, выбраны следующие модели мишеней.

Для системы с бланкетом, охлаждаемым сплавом Pb-Bi, естественно выбрать и мишень на свинце- висмуте. Конструкция и теплогидравлические условия работы такой мишени рассмотрены, например, в работе [12]. Для расчетного анализа взаимодействия нейтронов “скальвания” с бланкетом достаточно было схематично представить эту мишень в виде цилиндра, заполненного сплавом Pb-Bi, с радиусом ~ 10 см и длиной 60 см. Расчеты общего числа нейтронов “скальвания”, рождающихся на один протон, и их спектров были выполнены с помощью программного комплекса ЛАНЕТ (LCS) [9]. Расчеты были произведены для трех энергий протона: 600, 1500, 5000 МэВ. Об эффективности такой мишени можно судить по данным таблицы 1, в которой приведены интегральные величины наработки и утечки нейтронов

Таблица 1

Число нейтронов “скальвания” и нейтронов утечки  
для мишени из Pb-Bi

Энергия Протона, МэВ	Общее число нейтронов “скальвания”, нейтрон/протон	Общее число нейтронов утечки, нейтрон/протон	Паразитные потери, %
800	17.89	17.52	2.12
1500	35.49	32.95	1.65
5000	91.65	90.25	1.55

Полученные спектры были преобразованы в стандартный 26-групповой вид, используемый в реакторных расчетах [13]. При этом нейтроны с энергией  $>10.5$  МэВ были включены в первую энергетическую группу. Эти спектры приведены в таблице 2

Таблица 2

Спектры нейтронов “скалывания” для мишени из сплава Pb-Bi

Номер группы	Спектр 1 $E_p = 800$ МэВ	Спектр 2 $E_p = 1500$ МэВ	Спектр 3 $E_p = 5000$ МэВ
1	0.121	0.142	0.3577
2	0.0602	0.0665	0.1271
3	0.1027	0.1039	0.1347
4	0.2047	0.1986	0.1482
5	0.201	0.1915	0.1011
6	0.169	0.161	0.0703
7	0.083	0.0798	0.0326
8	0.0348	0.0336	0.0142
9	0.0147	0.01415	0.009
10	0.0056	0.00544	0.005
11	0.00213	0.00202	0
12	0.000743	0.000682	0
13	0.00026	0.00024	0
14	0.000091	0.00009	0
15	0.00003	0.00003	0
16	0.000013	0.00001	0
17	0.36E-05	0.52E-06	0
18	0.98E-06	1.84E-6	0
19	0	0	0

Для гибридной ядерной мишени с натриевым blanketом были выбраны две мишени из вольфрама. Предполагается, что их охлаждение можно организовать также натрием.

Первую мишень схематично можно представить в виде сплошного цилиндра из W радиусом 5 см и длиной 50 см. Такая форма мишени рассматривается как крайний случай для оценки максимального выхода нейтронов.

Вторая мишень разделенная, ее конструкция предусматривает возможность охлаждения потоком натрия. Она состоит из цилиндрических дисков с радиусом 10 см и толщиной 2 см, разделенных слоями натрия толщиной 4 см. Таким образом, общая длина этой мишени 60 см, радиус 10 см. Подобного рода мишени рассмотрены в [11].

Представление об эффективности этих мишеней дают общие величины родившихся в объеме мишеней нейтронов “скальвания” и нейтронов утечки через боковые поверхности. Они рассчитаны по комплексу ЛАНЕТ для двух энергий протона: 800 Мэв и 1500 Мэв. Эти величины приведены в таблице 3. По эффективности эти мишени сравнимы. Это означает, что в конкретных конструкторских проработках можно будет без больших потерь реализовать более удобные для организации охлаждения варианты разделенной мишени.

Таблица 3

Число нейтронов “скальвания” и нейтронов утечки  
для мишеней из W

1-я мишень, цилиндр из W, $r=5$ см, $L=50$ см			
Энергия протона, Мэв	Общее число нейтронов “скальвания”, нейтрон/протон	Общее число нейтронов утечки, нейтрон/протон	Паразитные потери, %
800	18.31	17.35	5.53
1500	35.50	34.02	4.35
2-я разделенная мишень, $r=10$ см, $L=60$ см			
800	16.34	15.50	5.42
1500	30.45	28.83	5.62

Спектры нейтронов “скальвания” для этих мишеней при энергии протонов 800 Мэв и 1500 Мэв приведены в таблице 4.

Таблица 4

Спектры нейтронов “скалывания” для мишеней с натрием

Номер группы	Мишень сплошная		Мишень разделенная	
	Спектр 1, $E_p = 800$ МэВ	Спектр 2, $E_p = 1500$ МэВ	Спектр 3, $E_p = 800$ МэВ	Спектр 4, $E_p = 1500$ МэВ
1	.2511E+00	.3023E+00	.2660E+00	.3193E+00
2	.1291E+00	.1326E+00	.1293E+00	.1328E+00
3	.1505E+00	.1421E+00	.1488E+00	.1403E+00
4	.1745E+00	.1582E+00	.1704E+00	.1539E+00
5	.1243E+00	.1112E+00	.1208E+00	.1070E+00
6	.9077E-01	.8152E-01	.8776E-01	.7790E-01
7	.4457E-01	.4006E-01	.4299E-01	.3829E-01
8	.2014E-01	.1823E-01	.1941E-01	.1732E-01
9	.9257E-02	.8417E-02	.8917E-02	.7997E-02
10	.3635E-02	.3265E-02	.3454E-02	.3097E-02
11	.1381E-02	.1251E-02	.1313E-02	.1194E-02
12	.5117E-03	.5045E-03	.5161E-03	.4542E-03
13	.2089E-03	.2095E-03	.2029E-03	.1887E-03
14	.8411E-04	.8138E-04	.8721E-04	.7366E-04
15	.2895E-04	.2870E-04	.3244E-04	.3200E-04
16	.1174E-04	.1113E-04	.7650E-05	.9688E-05
17	.2458E-05	.3380E-05	.2142E-05	.3120E-05
18	.1638E-05	.1408E-05	.9180E-06	.9852E-06
19	.0000E+00	.1408E-06	.3060E-06	.1642E-06

## 2. Бланкет для подкритической системы со свинцово-висмутовым теплоносителем.

### 2.1. Краткое описание конструкции blankets.

В качестве основного элемента конструкции подкритического blankets, охлаждаемого свинцово-висмутовым теплоносителем, принята шестигранная тепловыделяющая сборка (ТВС), описанная в работе [6].

ТВС представляет собой шестигранный стальной кожух размером "под ключ" 150 мм и толщиной 2 мм, внутри которого размещены 198 ТВЭЛов, образующих треугольную решетку с шагом 9,83 мм. В центральной части ТВС располагаются стальные конструкции, обеспечивающие возможность ее извлечения и крепления. Стержневой ТВЭЛ представляет собой заполненную топливной композицией стальную трубку внешним диаметром 8 мм и

толщиной 0,4 мм с 4 винтовыми внешними ребрами. Ребра обеспечивают дистанционирование твэлов по всей их высоте.

ТВС образуют в активной зоне бланкета треугольную решетку с шагом 152 мм.

Радиальный размер бланкета довольно жестко определяется допустимыми значениями средней скорости свинцово-висмутового теплоносителя и максимальной температуры оболочки твэла. Если в соответствии с данными работы [6] принять эти величины равными соответственно 2,5 м/с и 600°C, то для обеспечения тепловой мощности 500 Мвт понадобится 144 ТВС описанной выше конструкции. При этом коэффициент радиальной неравномерности поля мощности не должен превышать значение  $K_r^{max} = 1,4$ . Высота активной зоны бланкета определяется исходя из условия, что максимальное накопление осколков деления в топливной композиции за кампанию ТВС составляет 10 ÷ 11% т.а., и для рассматриваемого бланкета составляет  $H_{аз} = 900$  мм.

Таким образом, в настоящей работе рассматривается бланкет с размерами  $D_{эКВ} \times H_{аз} = 1961 \times 900$  мм, содержащий 144 ТВС. В центре бланкета располагается канал мишени, вытесняющий 7 ТВС. Активная зона окружена боковым отражателем из 2 рядов шестигранных стальных пакетов, имеющих такой же размер "под ключ", как ТВС активной зоны. Считалось, что бланкет вместе с отражателем погружен в большой объем свинцово-висмутового сплава.

Рассмотрены два варианта топливной композиции:

- моонитрид урана UN с эффективной плотностью 11,6 г/см<sup>3</sup>;
- диоксид урана UO<sub>2</sub> с эффективной плотностью 9,5 г/см<sup>3</sup>.

Под эффективной плотностью понимается плотность композиции, гомогенизированной внутри оболочки твэла с учетом зазоров на распухание топлива.

Для выравнивания распределения мощности по радиусу бланкета применяется трехзонное профилирование обогащением топлива по урану-235 – обогащение растет от центра к периферии активной зоны.

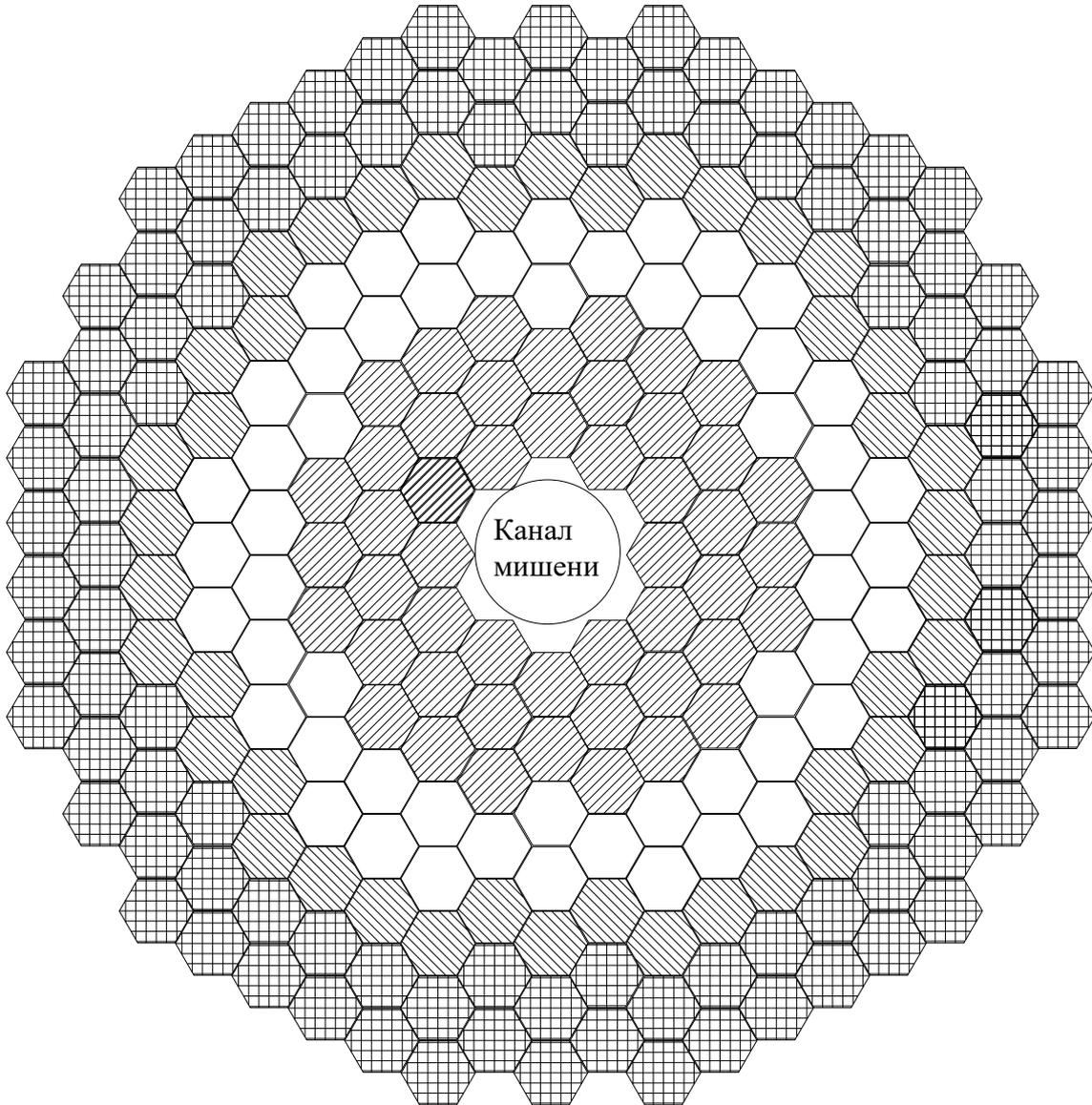
Схема поперечного сечения бланкета показана на рис.1.

Предполагается, что бланкет работает в режиме частичных перегрузок топлива по схеме, принятой в быстрых реакторах типа БН – без перестановок ТВС. При указанном выше максимальном накоплении осколков (10 ÷ 11% т.а.) длительность кампании ТВС при коэффициенте использования мощности КИМ = 0,8 составляет:

- для топлива UN  $T_{ТВС} = 5$  календарных лет;
- для топлива UO<sub>2</sub>  $T_{ТВС} = 4$  календарных года.

Период между двумя последовательными частичными перегрузками  $\tau$ , называемый далее микрокампанией, принят равным  $\tau = 1$  календарному году для обоих видов топлива.

Рис. 1 Схема поперечного сечения blankets со свинцово-висмутовым теплоносителем



За боковым отражателем располагается слой Pb-Bi толщиной ~ 500 мм



ТВС тип 1 (малое обогащение)



ТВС тип 2 (среднее обогащение)



ТВС тип 3 (большое обогащение)

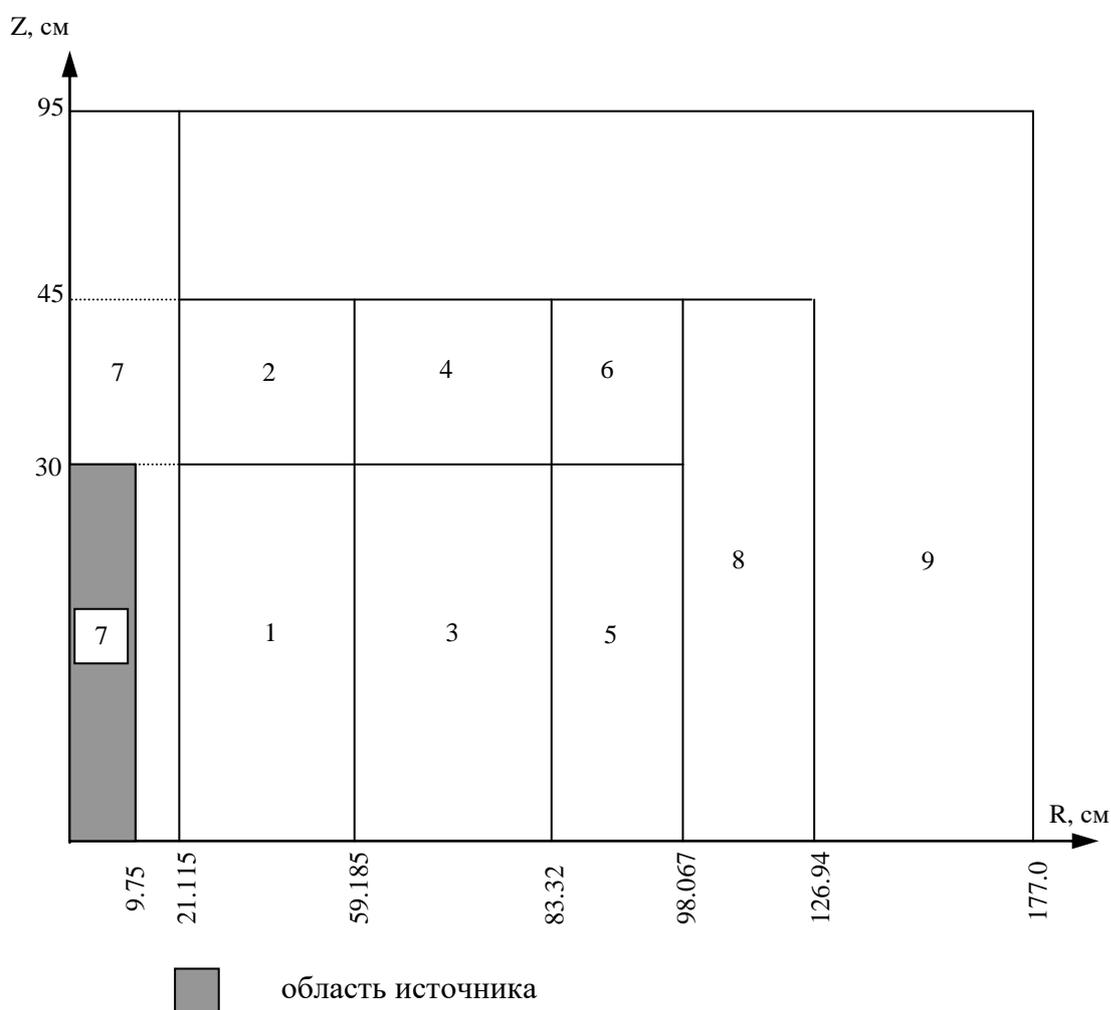


Пакет бокового отражателя

## 2.2. Определение ядерно-физического состава и расчет физических характеристик blankets со свинцово-висмутовым теплоносителем в установившемся режиме.

Расчеты подкритического blankets выполнены с источником нейтронов, расположенном в центральном канале. Расчеты выполнялись в двумерной (R-Z)-геометрии в 26-групповом диффузионном приближении с использованием программного пакета РЕАКТОР [10]. Расчетная модель показана на рис.2.

Рис.2. Расчетная (R-Z) модель blankets со свинцово-висмутовым теплоносителем (центральная плоскость blankets).



В настоящей работе не рассматривалась процедура выхода blankets в установившийся режим работы. При принятой схеме частичных перегрузок в активной зоне blankets с топливом UN (вариант 1-1, 5 перегрузок) в конце

микрокампании из каждой зоны физического профилирования извлекается 1/5 часть ТВС, отработавших кампанию, и загружается такое же количество ТВС со свежим топливом соответствующего начального состава. Нетрудно видеть, что в установившемся режиме ядерно-физический состав в начале микрокампании будет примерно соответствовать составу после выгорания начальной загрузки в течение времени  $\sim 2\tau$ . Для бланкета с топливом  $UO_2$  (вариант 1-2, 4 перегрузки) в установившемся режиме ядерно-физический состав в начале микрокампании будет примерно соответствовать составу после выгорания начальной загрузки в течение времени  $\sim 1,5\tau$ .

Для бланкетов с указанными выше топливными композициями (варианты 1-1 и 1-2) требовалось определить ядерно-физический состав в начале микрокампании, при котором эффективный коэффициент размножения (без внешнего источника) составляет  $K_{эфф} \approx 0,965$ . При этом в бланкете с источником, работающем на заданном уровне мощности, неравномерность радиального поля мощности не должна превышать заданную выше величину  $K_r^{max} = 1,4$  как в начале, так и в конце микрокампании.

Принято, что внешний источник равномерно распределен в области, указанной на рис.2; канал мишени заполнен смесью стали и теплоносителя. Спектр источника принят в соответствии с данными раздела 1. Основная часть расчетов выполнена с источником, имеющим спектр 1, который приведен в таблице 1 раздела 1.

В результате вариантных расчетов определены ядерно-физические составы в начале микрокампании для вариантов 1-1 и 1-2.

В таблицах 5, 6, 7 приводятся ядерные концентрации нуклидов в физических зонах (нумерация зон соответствует рис.2) в начале микрокампании бланкетов вариантов 1-1 и 1-2. В таблице 8 приведены некоторые нейтронно-физические характеристики этих вариантов, а именно:

- значение  $K_{эфф}$  для бланкета без источника в начале микрокампании;
- величина умножения  $M$  (число нейтронов, рожденных в бланкете на 1 нейтрон источника) в начале и в конце микрокампании;
- величина  $K_s = \frac{M}{M+1}$  в начале и в конце микрокампании;
- величина  $K_r^{max}$  в начале и в конце микрокампании;
- требуемая мощность источника  $S_{ист}$  в начале и в конце микрокампании;

мощность определяется как

$$S_{ист} = \frac{3.12 * 10^{16} N_{бл} v_{эфф}}{M},$$

где  $N_{бл}$  – мощность бланкета, Мвт.

Распределение мощности по радиусу бланкетов в начале и в конце микрокампании показано на рис.3, 4.

Таблица 5

Ядерные концентрации нуклидов в активной зоне blankets в начале  
 микрокампании (в ед.  $10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>)  
 Вариант 1-1 - теплоноситель Pb-Bi, топливо UN

Нуклид	Номер физической зоны blankets на расчетной (R-Z)-модели рис.2					
	1	2	3	4	5	6
U-234	0.1767E-09	0.9426E-10	0.1478E-09	0.7544E-10	0.1300E-09	0.7036E-10
U-235	0.7812E-03	0.8288E-03	0.1449E-02	0.1526E-02	0.2175E-02	0.2162E-02
U-236	0.4565E-04	0.3723E-04	0.6443E-04	0.5162E-04	0.7658E-04	0.6008E-04
U-238	0.9865E-02	0.9941E-02	0.9151E-02	0.9214E-02	0.8434E-02	0.8589E-02
Pu-238	0.4758E-07	0.2518E-07	0.3860E-07	0.1960E-07	0.3338E-07	0.1799E-07
Pu-239	0.2544E-03	0.2030E-03	0.1913E-03	0.1507E-03	0.1408E-03	0.1145E-03
Pu-240	0.6355E-05	0.4151E-05	0.3426E-05	0.2187E-05	0.2157E-05	0.1483E-05
Pu-241	0.1088E-06	0.6843E-07	0.4405E-07	0.2904E-07	0.4470E-07	0.3245E-07
Pu-242	0.1230E-08	0.6670E-09	0.4417E-09	0.2773E-09	0.3887E-09	0.2702E-09
Np-237	0.9804E-06	0.6441E-06	0.1060E-05	0.6748E-06	0.1089E-05	0.7081E-06
Am-241	0.2587E-08	0.1686E-08	0.1135E-08	0.7883E-09	0.1183E-08	0.8863E-09
Осколки U	0.2170E-03	0.1661E-03	0.3211E-03	0.2429E-03	0.3585E-03	0.2651E-03
Осколки Pu	0.2697E-04	0.1598E-04	0.1800E-04	0.1037E-04	0.1056E-04	0.6415E-05
N	0.1120E-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 6

Ядерные концентрации нуклидов в активной зоне blankets в начале  
микрокампании  
(в ед.  $10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>)

Вариант 1-2 - теплоноситель Pb-Bi, топливо UO<sub>2</sub>

Нуклид	Номер физической зоны blankets на расчетной (R-Z)-модели рис.2					
	1	2	3	4	5	6
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
Осколки U	0.1593E-03	0.1234E-03	0.2397E-03	0.1805E-03	0.2806E-03	0.2149E-03
Осколки 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 7

Ядерные концентрации нуклидов в неразмножающихся областях  
(в ед.  $10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>)

Нуклид	Физическая зона на расчетной (R-Z)-модели рис.2		
	7	8	9
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

Таблица 8

Характеристики бланкетов, охлаждаемых свинцово-висмутовым  
теплоносителем (спектр источника 1)

Характеристика	Вариант 1-1		Вариант 1-2	
	начало микро- кампании	конец микро- кампании	начало микро- кампании	конец микро- кампании
$K_{эфф}$	0,966	-	0,965	-
$M$	22,835	20,316	22,89	17,371
$K_s$	0,9580	0,9531	0,9581	0,9456
$K_r^{max}$	1,2	1,35	1,2	1,42
$V_{эфф}$	2,446	2,446	2,422	2,422
$S_{ист, н/сек}$	$1,67 \cdot 10^{18}$	$1,88 \cdot 10^{18}$	$1,65 \cdot 10^{18}$	$2,175 \cdot 10^{18}$

Рис 3. Распределение мощности по радиусу blankets  
варианта 1-1

(топливо - UN, теплоноситель - Pb-Bi)

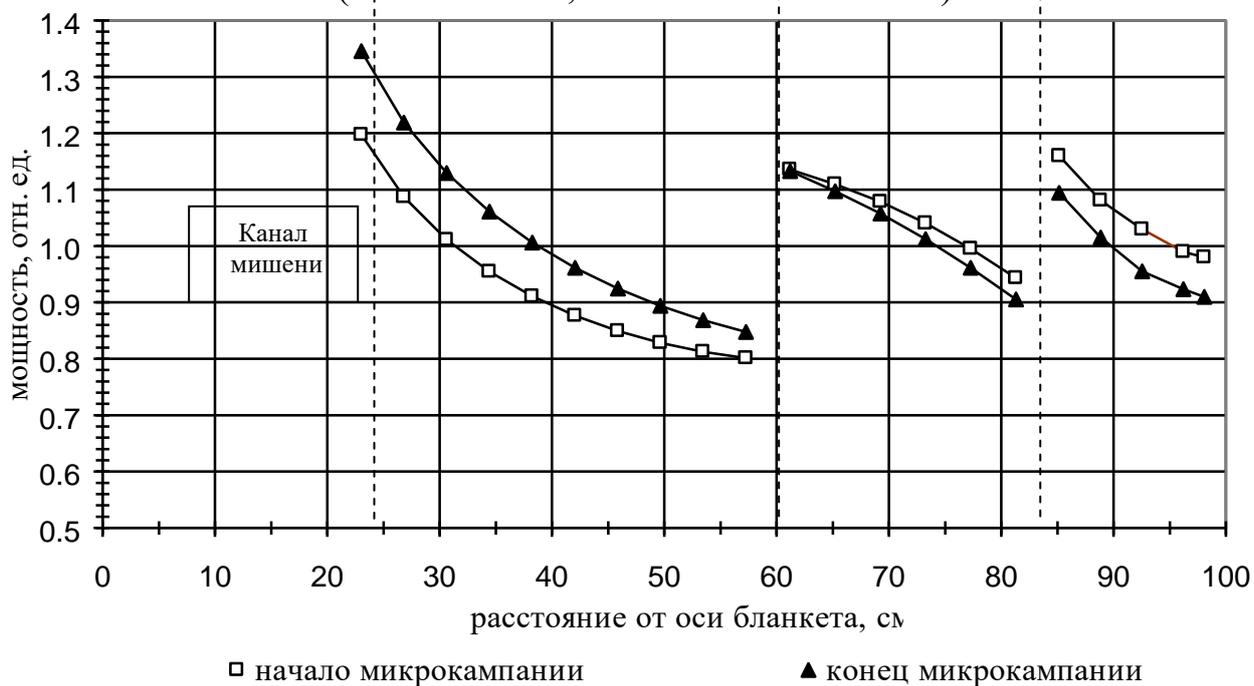
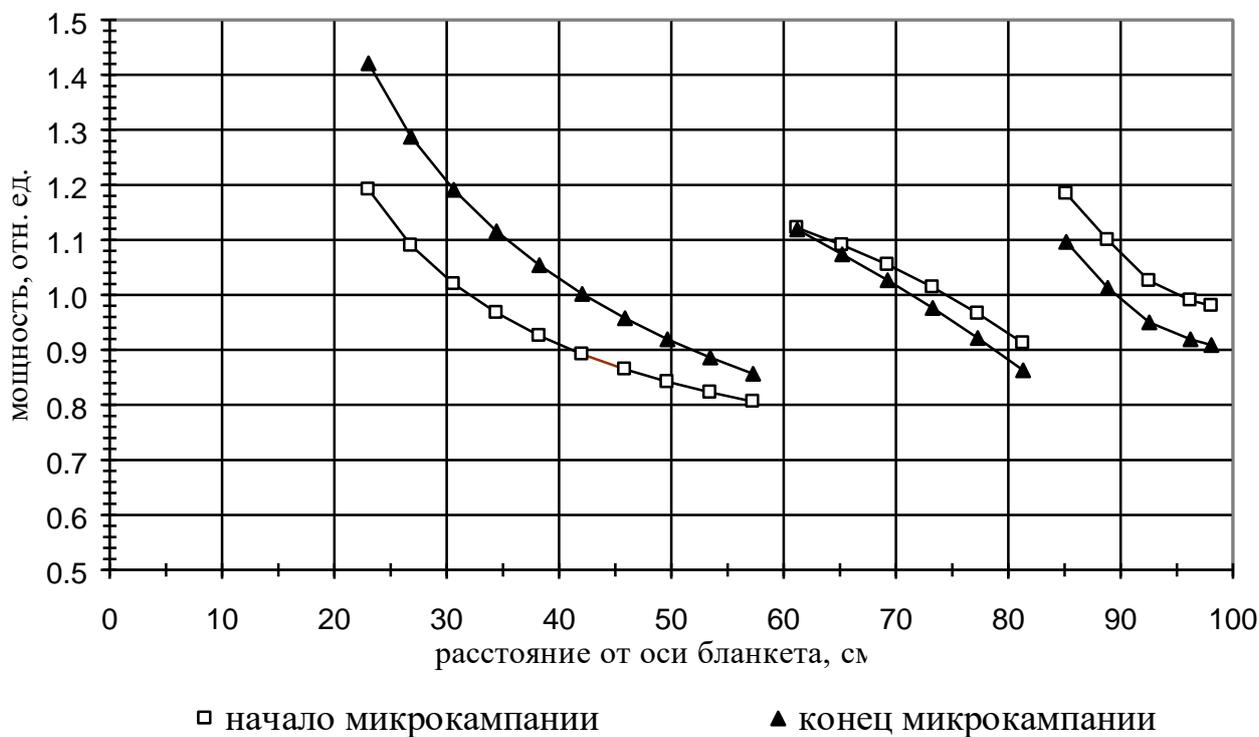


Рис 4. Распределение мощности по радиусу blankets  
варианта 1-2 (топливо - UO<sub>2</sub>, теплоноситель - Pb-Bi)



пунктиром показаны цилиндризованные границы зон физического профилирования

Для blankets с нитридным топливом выполнены расчеты умножения  $M$  в начале микрокампании с источниками различного спектра, описанными в разделе 1. Результаты этих расчетов приведены в таблице 9.

Таблица 9.

Умножение в подкритическом blanketе с источником различных спектров  
(вариант 1-1,  $K_{эфф} = 0,966$ )

Тип источника	1	2	3
$M$	22,835	22,876	25,112

### 3. Blanket для подкритической системы с натриевым теплоносителем.

В качестве основного элемента конструкции подкритического blanketа, охлаждаемого натриевым теплоносителем, принята шестигранная тепловыделяющая сборка (ТВС), применяющаяся в быстрых натриевых реакторах типа БН-800 [7,8].

ТВС представляет собой шестигранный стальной кожух размером "под ключ" 94,5 мм и толщиной 2,5 мм, внутри которого размещены 127 ТВЭлов, образующих треугольную решетку. Стержневой ТВЭл представляет собой заполненную топливной композицией стальную трубку внешним диаметром 6,6 мм и толщиной 0,4 мм. Дистанционирование ТВЭлов внутри ТВС осуществляется навивкой на оболочку стальной проволоки. Длина активной части ТВЭла ТВС образуют в активной зоне blanketа треугольную решетку с шагом 100 мм.

При определении размеров blanketа было принято, что средняя мощность ТВС blanketа равна средней мощности ТВС реактора БН-800. Как представляется, в этом случае при близких значениях максимальной неравномерности поля мощности ( $K_r^{max} \approx 1,4 \div 1,5$ ) будет обеспечен нормальный температурный режим работы ТВЭлов. Если сохранить высоты активной зоны реактора БН-800  $H_{аз} = 840$  мм, то для blanketа тепловой мощностью 500 Мвт понадобится 135 ТВС описанной выше конструкции. Однако для получения правильной (близкой к цилиндрической) формы активной зоны было использовано 144 ТВС.

Таким образом, в настоящей работе рассматривается blanket с размерами  $D_{эКВ} \times H_{аз} = 1290 \times 840$  мм, содержащий 144 ТВС. В центре

бланкета располагается канал мишени, вытесняющий 7 ТВС. Активная зона окружена боковым отражателем из нескольких рядов шестигранных стальных пакетов, имеющих такой же размер "под ключ", как ТВС активной зоны. Эффективная толщина бокового отражателя ~ 400 мм.

Рассмотрены два варианта топливной композиции:

- моноксид урана UN с эффективной плотностью  $11,6 \text{ г/см}^3$ ;
- диоксид урана  $\text{UO}_2$  с эффективной плотностью  $9,5 \text{ г/см}^3$ .

Так же, как и в бланкетах со свинцово-висмутовым теплоносителем, для выравнивания распределения мощности по радиусу бланкета применяется трехзонное профилирование обогащением топлива по урану-235.

Схема поперечного сечения бланкета показана на рис.5.

Предполагалось, что бланкет работает в режиме частичных перегрузок топлива без перестановок ТВС. При максимальном накоплении осколков  $\approx 10 \div 11\%$  т.а. длительность кампании ТВС при коэффициенте использования мощности КИМ = 0,8 составляет:

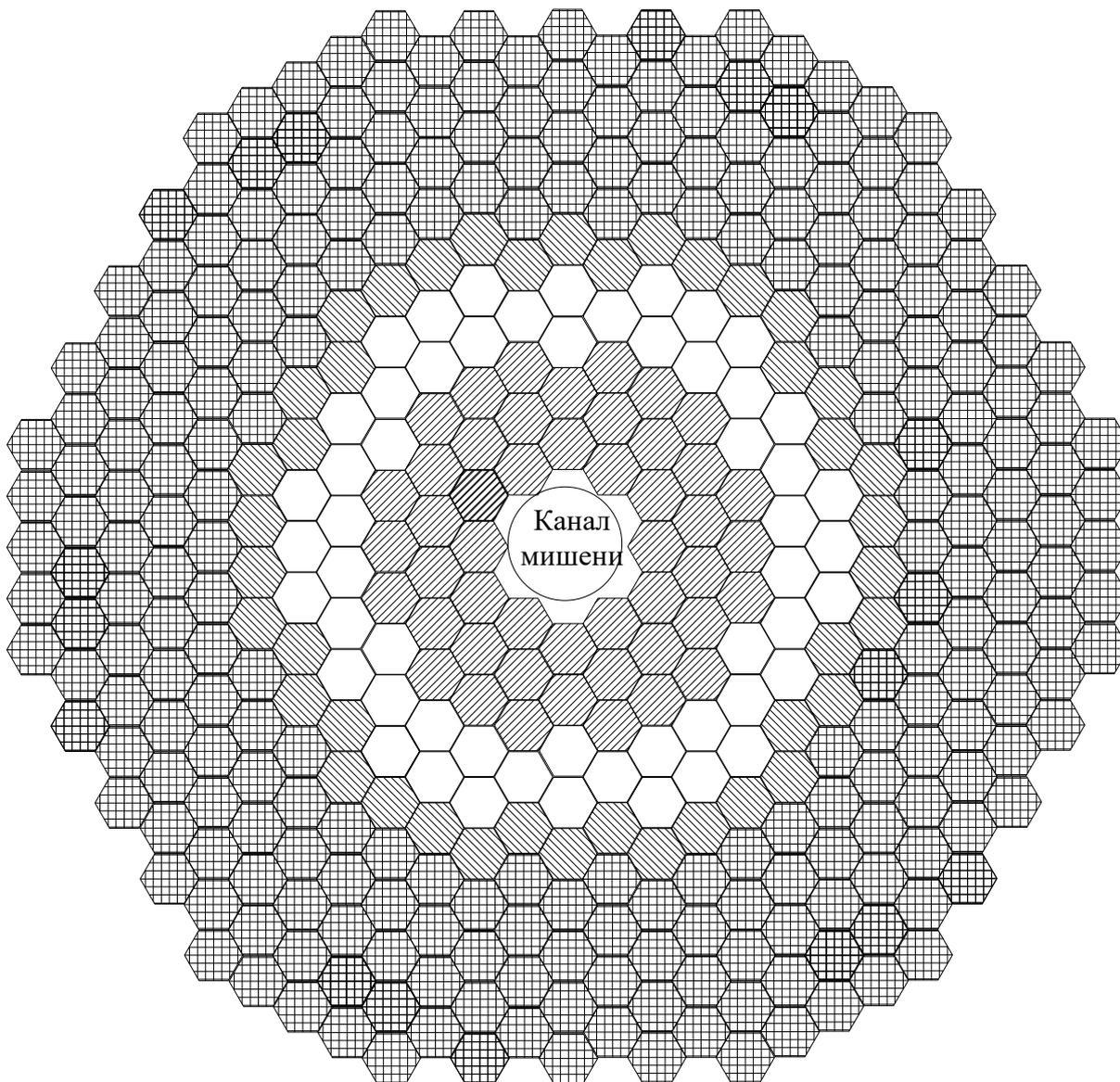
- для топлива UN  $T_{\text{ТВС}} = 2$  календарных года;
- для топлива  $\text{UO}_2$   $T_{\text{ТВС}} = 1,5$  календарных года.

Длительность микрокампании принята равной  $\tau = 0,5$  календарного года для обоих видов топлива. Для бланкета с топливом UN (вариант 2-1, 4 перегрузки) в установившемся режиме ядерно-физический состав в начале микрокампании будет примерно соответствовать составу после выгорания начальной загрузки в течение времени  $\sim 1,5\tau$ . Для бланкета с топливом  $\text{UO}_2$  (вариант 2-2, 3 ежегодные перегрузки) в установившемся режиме ядерно-физический состав в начале микрокампании будет примерно соответствовать составу после выгорания начальной загрузки в течение времени  $\sim 1\tau$ .

### **3.1. Расчет ядерно-физического состава бланкета в установившемся режиме.**

Выполнены расчеты подкритического бланкета с источником нейтронов, расположенном в центральном канале. Расчеты выполнялись в двумерной (R-Z)-геометрии в 26-групповом диффузионном приближении с использованием программного пакета РЕАКТОР [10]. Расчетная модель показана на рис.6.

Рис.5. Схема поперечного сечения blankets с натриевым теплоносителем



ТВС тип 1 (малое обогащение)



ТВС тип 2 (среднее обогащение)

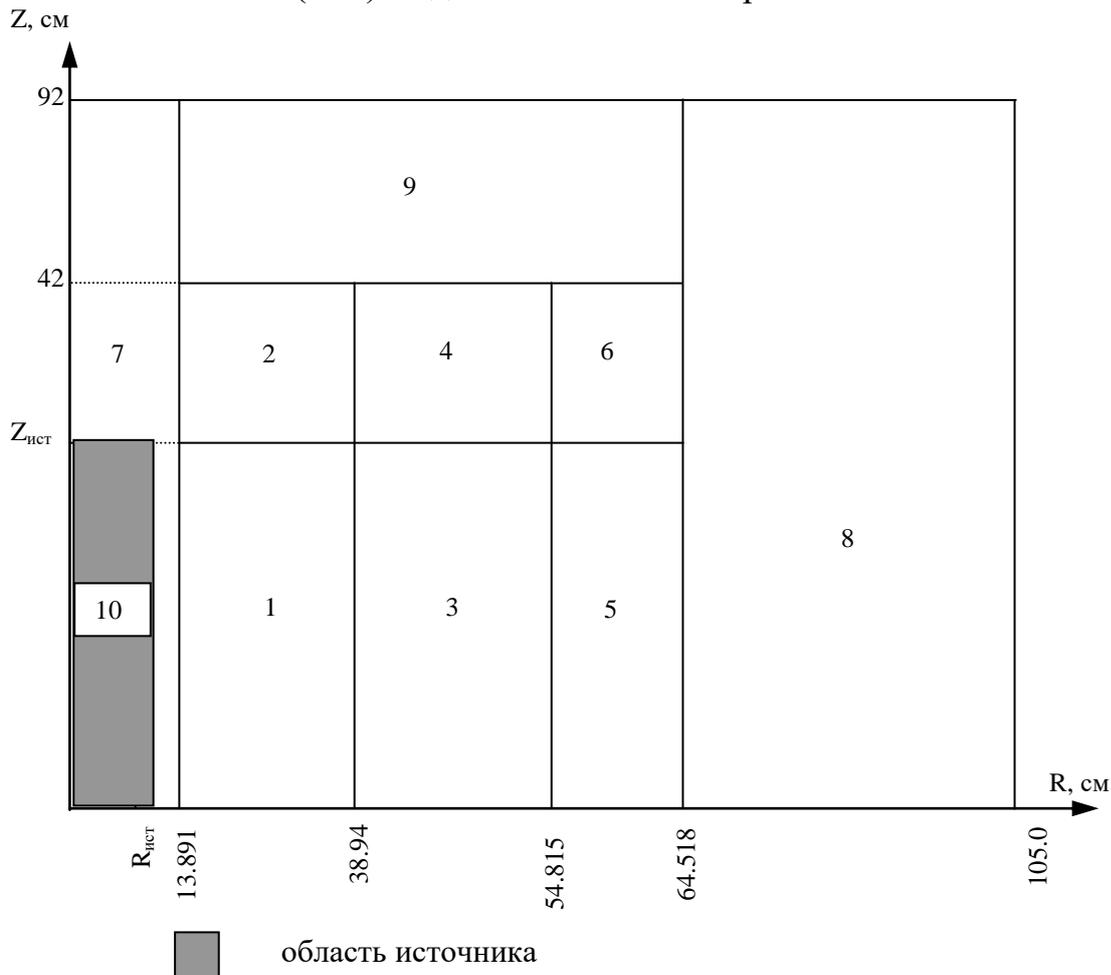


ТВС тип 3 (большое обогащение)



Пакет бокового отражателя

Рис.6. Расчетная (R-Z) модель blankets с натриевым теплоносителем



Требовалось определить ядерно-физический состав в начале микрокампании, при котором без внешнего источника  $K_{эфф} \approx 0,965$ . При этом в blanketе с источником, работающем на заданном уровне мощности, неравномерность радиального поля мощности не должна превышать заданную выше величину  $K_r^{max} \sim 1,5$  как в начале, так и в конце микрокампании.

Внешний источник считался равномерно распределенным в области, указанной на рис.6. В вариантах 2-1 и 2-2 размеры области источника  $R_{ист} = 5$  см,  $Z_{ист} = 25$  см, канал мишени заполнен смесью стали и теплоносителя. Спектр источника принят в соответствии с данными, приведенными в таблице 4 раздела 1 (спектр 1,  $E_p = 800$  МэВ).

В результате вариантных расчетов определены ядерно-физические составы в начале микрокампании для вариантов 2-1 и 2-2.

В таблицах 10, 11, 12 приводятся ядерные концентрации нуклидов в физических зонах (нумерация зон соответствует рис.6) в начале микрокампании blanketов вариантов 2-1 и 2-2. В таблице 13 приведены некоторые нейтронно-физические характеристики этих вариантов.

Распределение мощности по радиусу бланкетов в начале и в конце микрокампании показано на рис.7, 8.

Таблица 10

Ядерные концентрации нуклидов в активной зоне бланкета в начале микрокампании (в ед.  $10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>)

Вариант 2-1 - теплоноситель Na, топливо UN

Нуклид	Номер физической зоны бланкета на расчетной (R-Z)-модели рис.6					
	1	2	3	4	5	6
U-234	0.4450E-10	0.3070E-10	0.2433E-10	0.1577E-10	0.2560E-10	0.164E-10
U-235	0.1338E-02	0.1392E-02	0.1950E-02	0.2016E-02	0.2715E-02	0.278E-02
U-236	0.5493E-04	0.4689E-04	0.5826E-04	0.4862E-04	0.6911E-04	0.574E-04
U-238	0.8933E-02	0.8983E-02	0.8340E-02	0.8380E-02	0.7575E-02	0.760E-02
Pu-238	0.3105E-07	0.2138E-07	0.1689E-07	0.1086E-07	0.1781E-07	0.113E-07
Pu-239	0.1664E-03	0.1342E-03	0.1216E-03	0.9707E-04	0.9254E-04	0.741E-04
Pu-240	0.3044E-05	0.2249E-05	0.1507E-05	0.1090E-05	0.1100E-05	0.786E-06
Pu-241	0.4452E-07	0.5646E-07	0.1412E-07	0.1637E-07	0.1998E-07	0.169E-07
Pu-242	0.4293E-09	0.4607E-09	0.1728E-09	0.1717E-09	0.1932E-09	0.166E-09
Np-237	0.8787E-06	0.6853E-06	0.6683E-06	0.4958E-06	0.7699E-06	0.568E-06
Am-241	0.4822E-09	0.5914E-09	0.2159E-09	0.2384E-09	0.2697E-09	0.244E-09
Осколки U	0.2597E-03	0.2024E-03	0.2895E-03	0.2222E-03	0.3111E-03	0.240E-03
Осколки Pu	0.1335E-04	0.8260E-05	0.8052E-05	0.4820E-05	0.5014E-05	0.304E-05
N	0.1077E-01					
Fe	0.1131E-01					
Cr	0.2542E-02					
Mo	0.1826E-03					
Ni	0.1564E-02					
Na	0.8957E-02					

Таблица 11

Ядерные концентрации нуклидов в активной зоне blankets в начале  
микрокампании  
(в ед.  $10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>)

Вариант 2-2 - теплоноситель Na, топливо UO<sub>2</sub>

Нуклид	Номер физической зоны blankets на расчетной (R-Z)-модели рис.6					
	1	2	3	4	5	6
U-234	0.1640E-10	0.1128E-10	0.8702E-11	0.5669E-11	0.8864E-11	0.571E-11
U-235	0.1201E-02	0.1240E-02	0.1737E-02	0.1783E-02	0.2391E-02	0.244E-02
U-236	0.4110E-04	0.3478E-04	0.4291E-04	0.3551E-04	0.4972E-04	0.410E-04
U-238	0.6694E-02	0.6726E-02	0.6175E-02	0.6199E-02	0.5523E-02	0.554E-02
Pu-238	0.1704E-07	0.1165E-07	0.8922E-08	0.5717E-08	0.9107E-08	0.577E-08
Pu-239	0.1075E-03	0.8587E-04	0.7654E-04	0.6050E-04	0.5642E-04	0.449E-04
Pu-240	0.1709E-05	0.1249E-05	0.8161E-06	0.5847E-06	0.5741E-06	0.407E-06
Pu-241	0.2198E-07	0.2758E-07	0.6661E-08	0.7682E-08	0.9089E-08	0.763E-08
Pu-242	0.2383E-09	0.2491E-09	0.1281E-09	0.1273E-09	0.1341E-09	0.123E-09
Np-237	0.5590E-06	0.4342E-06	0.4121E-06	0.3049E-06	0.4645E-06	0.341E-06
Am-241	0.2195E-09	0.2549E-09	0.1316E-09	0.1394E-09	0.1472E-09	0.140E-09
Осколки U	0.1777E-03	0.1384E-03	0.1948E-03	0.1492E-03	0.2065E-03	0.159E-03
Осколки Pu	0.6611E-05	0.4070E-05	0.3819E-05	0.2273E-05	0.2292E-05	0.138E-05
O	0.1646E-01					
Fe	0.1131E-01					
Cr	0.2542E-02					
Mo	0.1826E-03					
Ni	0.1564E-02					
Na	0.8957E-02					

Таблица 12.

Ядерные концентрации нуклидов в неразмножающихся областях  
(в ед.  $10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>)

Нуклид	Физическая зона на расчетной (R-Z)-модели рис.6			
	7	8	9	10
FE	0.3703E-01	0.5371E-01	0.3703E-01	0.3703E-01
CR	0.8466E-02	0.1511E-01	0.8466E-02	0.8466E-02
NI	0.5552E-02	0.6519E-02	0.5552E-02	0.5552E-02
MO	0.4527E-03	-	0.4527E-03	0.4527E-03
NB	0.7668E-04	-	0.7668E-04	0.7668E-04
NA	0.1016E-01	0.2718E-02	0.1016E-01	0.1016E-01

Таблица 13

Характеристики бланкетов, охлаждаемых натриевым теплоносителем  
(источник - спектр 1 в таблице 4 раздела 1)

Характеристика	Вариант 2-1		Вариант 2-2	
	начало микро-кампании	конец микро-кампании	начало микро-кампании	Конец микро-кампании
$K_{эфф}$	0,9644	-	0,965	-
$M$	32,112	20,463	33,162	17,747
$K_s$	0,9698	0,9533	0,9707	0,9467
$K_r^{max}$	1,31	1,443	1,29	1,45
$V_{эфф}$	2,423	2,423	2,407	2,407
$S_{ист, н/сек}$	$1,18 \cdot 10^{18}$	$1,85 \cdot 10^{18}$	$1,13 \cdot 10^{18}$	$2,12 \cdot 10^{18}$

Для blankets с нитридным топливом рассмотрен еще один вариант (2-3), в котором после уточнения конструкции мишени (см. раздел 1) в область источника введен вольфрам. Это привело к некоторому изменению ядерно-физического состава в установившемся режиме. Ниже описаны результаты расчета этого варианта.

В таблице 15 приводятся ядерные концентрации нуклидов в физических зонах (нумерация зон соответствует рис.6) в начале микрокампании. В таблице 14 приведены нейтронно-физические характеристики blankets, в том числе величины умножения  $M$  в начале микрокампании для blankets с источниками 4-х различных спектров, описанных в разделе . Распределение мощности по радиусу blankets с источником 1 в начале и в конце микрокампании показано на рис.9.

Таблица 14

Характеристики blankets с нитридным топливом  
(вариант 2-3,  $K_{эфф} = 0,9648$ )

Тип источника	Спектр 1				Спектр 2	Спектр 3	Спектр 4
	$M$	$K_s$	$S_{ист}, \text{н/сек}$	$K_r^{max}$			
Характеристика	$M$	$K_s$	$S_{ист}, \text{н/сек}$	$K_r^{max}$	$M$	$M$	$M$
начало микрокампании	31,49	0,9692	$1,2 \cdot 10^{18}$	1,29	31,65	31,46	31,75
конец микрокампании	19,89 3	0,9524	$1,9 \cdot 10^{18}$	1,42	-	-	-

Распределение мощности по радиусу бланкета варианта 2.  
(топливо - UN, теплоноситель - Na)

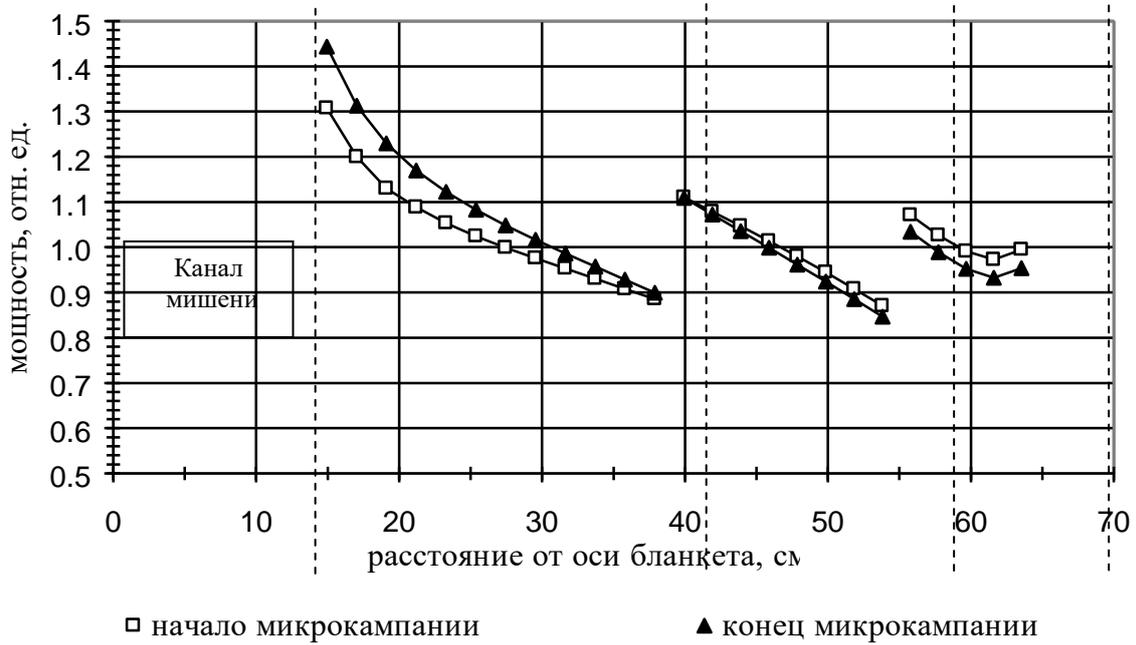
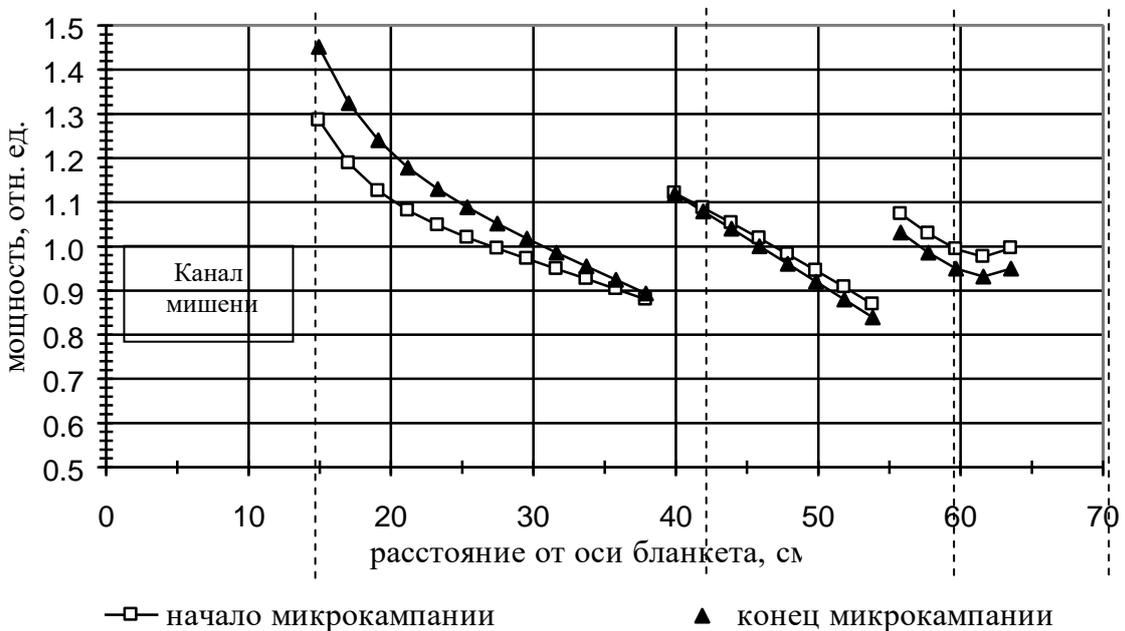


Рис.7

Распределение мощности по радиусу бланкета варианта 2.  
(топливо - UO<sub>2</sub>, теплоноситель - Na)



пунктиром показаны цилиндризованные границы зон физического профилирования

Рис.8

Таблица 15

Ядерные концентрации нуклидов в активной зоне blankets в начале  
микрокампании  
(в ед.  $10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>) вариант 2-3- теплоноситель Na, топливо UN

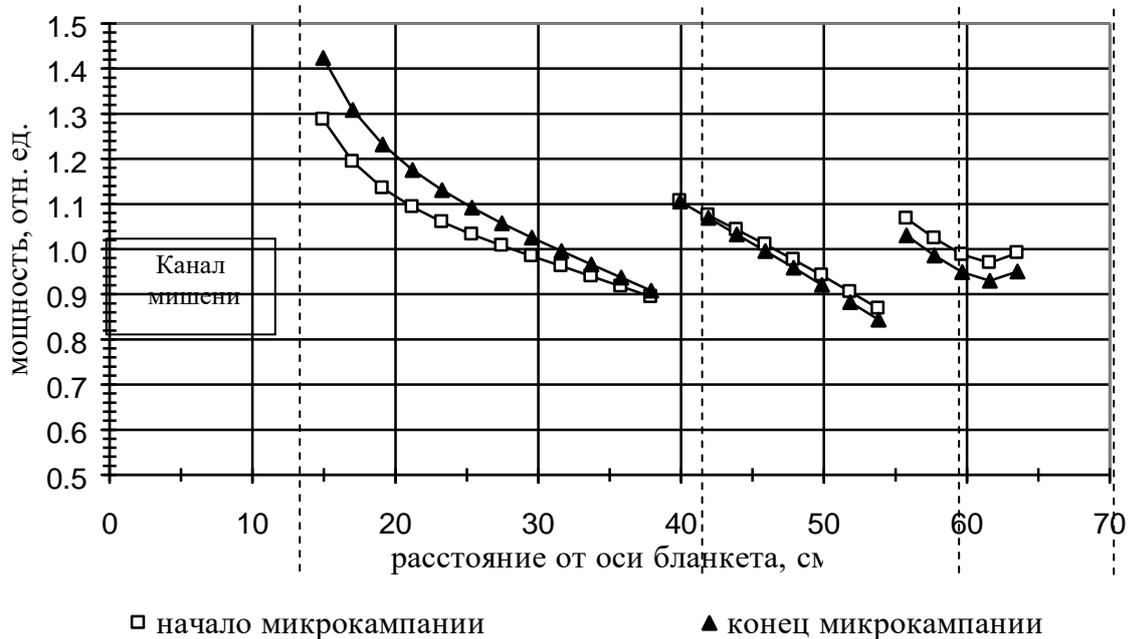
Нуклид	Номер физической зоны blankets на расчетной (R-Z)-модели рис.6					
	1	2	3	4	5	6
U-234	0.4736E-10	0.3231E-10	0.2694E-10	0.1720E-10	0.2835E-10	0.1812E-10
U-235	0.1358E-02	0.1407E-02	0.1939E-02	0.1999E-02	0.2702E-02	0.2770E-02
U-236	0.5706E-04	0.4916E-04	0.6021E-04	0.5083E-04	0.7148E-04	0.6028E-04
U-238	0.8895E-02	0.8940E-02	0.8334E-02	0.8370E-02	0.7570E-02	0.7597E-02
PU-238	0.3306E-07	0.2251E-07	0.1873E-07	0.1187E-07	0.1976E-07	0.1254E-07
PU-239	0.1701E-03	0.1410E-03	0.1258E-03	0.1033E-03	0.9578E-04	0.7890E-04
PU-240	0.3139E-05	0.2346E-05	0.1614E-05	0.1171E-05	0.1179E-05	0.8530E-06
PU-241	0.4210E-07	0.4735E-07	0.1561E-07	0.1484E-07	0.2202E-07	0.1702E-07
PU-242	0.4168E-09	0.4076E-09	0.1837E-09	0.1672E-09	0.2068E-09	0.1692E-09
NP-237	0.9221E-06	0.7149E-06	0.7158E-06	0.5274E-06	0.8247E-06	0.6084E-06
AM-241	0.4603E-09	0.5098E-09	0.2287E-09	0.2242E-09	0.2874E-09	0.2449E-09
Осколки U	0.2713E-03	0.2197E-03	0.3002E-03	0.2402E-03	0.3226E-03	0.2593E-03
Осколки Pu	0.1407E-04	0.9280E-05	0.8671E-05	0.5579E-05	0.5400E-05	0.3510E-05
N	0.1077E-01					
FE	0.1131E-01					
CR	0.2542E-02					
MO	0.1826E-03					
NI	0.1564E-02					
NA	0.8957E-02					

Таблица 16

Ядерные концентрации нуклидов в неразмножающих областях  
(в ед.  $10^{24}$  яд/см<sup>3</sup>)

Нуклид	Физическая зона на расчетной (R-Z)-модели рис.6				
	7	8	9	10 (источник 1, 2) $R_{ист}=5$ см, $Z_{ист}=15$ см	10-2 (источник 3, 4) $R_{ист}=10$ см, $Z_{ист}=31$ см
FE	-	0.3703E-01	0.5371E-01	-	-
CR	-	0.8466E-02	0.1511E-01	-	-
NI	-	0.5552E-02	0.6519E-02	-	-
MO	-	0.4527E-03	-	-	-
NB	-	0.7668E-04	-	-	-
W	-	-	-	0.6431E-01	0.2250E-01
NA	0.2540E-01	0.1016E-01	0.2718E-02	-	0.1457E-01

Распределение мощности по радиусу blankets варианта 2.  
(топливо - UN, теплоноситель - Na)



пунктиром показаны цилиндризованные границы зон физического профилирования

Рис.9

#### 4. Сравнение рассмотренных гибридных ядерных систем по величине тока и мощности пучка протонов

Проведенные расчеты позволяют детально сравнить рассмотренные системы по таким важным характеристикам, которые должен иметь ускоритель протонов, как величина тока в пучке протонов и его мощность.

Для первой установки со свинцово-висмутовым теплоносителем в таблице 17 собраны сравниваемые величины для двух видов ядерного топлива, энергия протонов  $E_p=800$  МэВ. Зависимость требуемого тока в пучке от величины энергии протонов иллюстрируется таблицей 18.

Таблица 17

Расчетные величины для сравнения систем с Pb-Bi с двумя видами топлива

Вид топлива	Момент микро-кампании, год	Требуемый источник нейтронов $S_{\text{нейт}}$ , нейтрон/сек	Требуемый ток в пучке протонов I, ма	Требуемая мощность пучка протонов $N_{\text{PR}}$ , МВт	$N_{\text{PR}}/N_{\text{блн}}$ , %
UN	0	$1.67 \cdot 10^{18}$	14.95	11.96	2.4
	1	$1.88 \cdot 10^{18}$	16.84	13.47	2.7
UO <sub>2</sub>	0	$1.65 \cdot 10^{18}$	14.78	11.82	2.4
	1	$2.18 \cdot 10^{18}$	19.48	15.58	3.1

Таблица 18

Расчетные величины для сравнения систем с Pb-Bi с различными пучками протонов (топливо UN)

Энергия протона, МэВ	Выход нейтронов на протон, нейт/прот	Требуемый источник нейтронов $S_{\text{нейт}}$ , нейтрон/сек	Требуемый ток в пучке протонов I, ма	Требуемая мощность пучка протонов $N_{\text{PR}}$ , МВт	$N_{\text{PR}}/N_{\text{блн}}$ , %
800 МэВ, спектр 1	17.89	$1.67 \cdot 10^{18}$	14.95	11.96	2.4
1500 МэВ, спектр 2	35.49	$1.67 \cdot 10^{18}$	7.54	11.31	2.3
5000 МэВ, спектр 3	91.1	$1.52 \cdot 10^{18}$	2.67	13.36	2.7

Аналогичное сравнение проведено и для установок с натриевым охлаждением. Результаты представлены в таблицах 19 и 20.

Таблица 19

Расчетные величины для сравнения систем с Na с двумя видами топлива

Вид топлива	Момент микро-кампании, год	Требуемый источник нейтронов $S_{\text{нейт}}$ , нейтрон/сек	Требуемый ток в пучке протонов I, ма	Требуемая мощность пучка протонов $N_{\text{PR}}$ , МВт	$N_{\text{PR}}/N_{\text{блн}}$ , %
UN	0	$1.18 \cdot 10^{18}$	10.30	8.24	1.7
	0.5	$1.85 \cdot 10^{18}$	16.20	12.95	2.6
-----					
UO <sub>2</sub>	0	$1.13 \cdot 10^{18}$	9.89	7.91	1.6
	0.5	$2.12 \cdot 10^{18}$	18.55	14.84	3.0

Таблица 20

Расчетные величины для сравнения систем с Na с различными пучками протонов (топливо UN)

Энергия протона, МэВ	Выход нейтронов на протон, нейт/прот	Требуемый источник нейтронов $S_{\text{нейт}}$ , нейтр/сек,	Требуемый ток в пучке протонов I, ма	Требуемая мощность пучка протонов $N_{\text{PR}}$ , МВт	$N_{\text{PR}}/N_{\text{блн}}$ , %
Сплошная мишень из W					
800 МэВ, спектр 1	18.31	$1.18 \cdot 10^{18}$	10.30	8.24	1.7
1500 МэВ, спектр 2	35.50	$1.17 \cdot 10^{18}$	5.28	7.92	1.6
Разделенная мишень из W					
800 МэВ, спектр 3	16.34	$1.18 \cdot 10^{18}$	11.58	9.27	1.9
1500 МэВ, спектр 4	30.45	$1.17 \cdot 10^{18}$	6.16	9.23	1.8

Как итог, можно сформулировать следующие выводы:

- Использование в качестве ядерного топлива моонитрида урана UN дает выигрыш по сравнению с UO<sub>2</sub> в токе пучка протонов ~ 15% в обеих установках с Pb-Bi и с Na.

- По энергии протонов в пучке ярко выраженного оптимума не наблюдается. Это обстоятельство предоставляет определенную свободу разработчикам специализированных ускорителей.
- В случае гибридной системы с охлаждением на натрии рассмотренная разделенная мишень из вольфрама проигрывает сплошной мишени в силе тока пучка протонов 12÷15%. Однако конструкцию такого типа мишеней можно в дальнейшем оптимизировать, чтобы уменьшить этот проигрыш.
- Гибридная ядерная система с натриевым теплоносителем имеет некоторое преимущество по величине требуемого тока пучка протонов (~45% в начале микрокампании, ~5% в конце микрокампании). Однако требуемый для ее работы диапазон изменения силы тока значительно больше (~57% для UN, ~87% для UO<sub>2</sub>), чем для системы с теплоносителем Pb-Bi (~13% для UN, ~32% для UO<sub>2</sub>)

## Заключение

В работе приведены результаты комплексных расчетов двух разработанных авторами моделей наиболее перспективных в настоящий момент гибридных ядерных систем - аналогах быстрых реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем: сплавом свинец-висмут и натрием. В качестве материала мишени рассмотрены свинец-висмут для установок первого типа и вольфрам для установок второго типа в виде сплошной и разделенной мишени.

Для каждого типа бланкета были рассмотрены два вида ядерного топлива: традиционный оксид урана UO<sub>2</sub> и перспективный нитрид урана UN. По энергии протонов в пучке расчеты были выполнены для 800, 1500, 5000 МэВ.

Схема расчета гибридных ядерных систем, включала в себя два этапа. На первом этапе по программному комплексу LANET определялся внешний источник нейтронов, который нарабатывается в реакциях взаимодействия пучка протонов с веществом мишени. На втором этапе процессы взаимодействия нейтронов внешнего источника в объеме всей установки рассчитывались по программному комплексу RACTOR.

Расчетным путем получены важные для сравнительного анализа многие физические характеристики, такие как выход нейтронов “скалывания” в мишени, их спектры, умножение нейтронов в бланкете, требуемая мощность нейтронного источника, требуемая сила тока в пучке протонов и др.

Проведенные расчетные исследования позволяют сделать некоторые выводы, имеющие значение для дальнейшего изучения и оптимизации ускорительно-управляемых ядерных систем.

Применение в рассмотренных blankets более плотного ядерного топлива, каким является монокристалл урана UN, дает заметный выигрыш в требуемом токе пучка протонов по сравнению с традиционным оксидом урана  $UO_2$ .

Зависимость требуемой мощности пучка протонов от их энергии в рассматриваемом диапазоне энергий (800-1500 МэВ) довольно слабая. Поэтому этот параметр может быть определен из требований эффективной работы специализированных ускорителей.

Рассмотренная гибридная ядерная система с натриевым теплоносителем имеет преимущество перед установкой с охлаждением сплавом свинец-висмут по величине требуемого тока пучка протонов. Однако в управлении эта установка, по-видимому, будет более трудная, так как требуемый для ее работы диапазон изменения силы тока значительно больше, чем для системы с теплоносителем Pb-Bi.

В случае гибридной системы с охлаждением на натрии рассмотренная простая разделенная мишень из вольфрама проигрывает сплошной мишени в величине требуемого тока в пучке. Это означает, что конструкцию такого типа мишеней можно и нужно оптимизировать.

## Литература

1. Proc. of the First International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Application, Las Vegas, July, 1994
2. Proc. of the Second International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Application, Kalmar, 3-7 June, 1996
3. Proc. of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Application (ADTT&A), Prague, 7-11, June, 1999
4. Б.Ф. Громов, Ю.С. Беломытцев и др. Реакторные установки с внутренне присущей безопасностью, охлаждаемые сплавом свинец-висмут, ж. Атомная энергия, т. 76, стр. 332-339.
5. B.F. Gromov, E.I. Efimov et al. Use of Lead-Bismuth Coolant in Nuclear Reactors and Accelerator-Driven Systems. Nucl. Eng. And Desing, v 173, p. 207-217, 1997
6. N.N. Novikova, Yu.G. Pashkin, V.V. Chekunov. Some Features of Subcritical Blankets Cooled with Lead-Bismuth. Proceedings of ADTT&A'99 Conference, No. PF-28, Prague, 1999.
7. V.I. Matveev, A.N. Chebeskov et al. Studies, Development and Justification of Core with zero sodium-Void Reactivity Effect of the BN-800 Reactor. Proc. International Topical Meeting "Sodium cooled Fast Reactor Safety", Obninsk, Russia, October 3-7, 1994
8. Evaluation of Benchmark Calculation on a Fast Power Reactor Core with near zero sodium Void Effect. IAEA-TECDOC-731, January, 1994
9. R.E. Prael and Lichtenstein, User Guide to LCS: The LANET Code System, LANL report LA-UR-89-3014, 1989
10. A.V. Voronkov, V.I. Arzhanov. REACTOR - Program System for Neutron-Physical Calculations. Proc. International Topical Meeting, Advances in Mathematics, Computational and Reactor Physics, Pittsburgh, USA, 1991.
11. G.J. Russell et al. Introduction to Spallation Physics and Spallation-Target Design. Proc. of the First International Conference on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Application, Las Vegas, July, 1994, pp. 93-104
12. Громов Б.Ф., Ефимов Е.И., Леончук М.П., Веремеев А.А., Чекунов В.В. Жидкометаллическая свинцово-висмутная мишень для высокоэнергетических протонов как интенсивный источник нейтронов в ускорительно-управляемых системах, ж. Атомная энергия. т. 80, 1996, 400-407
13. Л.П. Абагян, Н.О. Базазянц, М.Н. Николаев, А.М. Цибуля. Групповые константы для расчета реакторов и защиты. Справочник. М., Энергоиздат, 1981

