

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПРОРАБОТКИ УСКОРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ СО СВИНЦОВО- ВИСМУТОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Е.А. Земсков

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Дан краткий обзор выполненных в ГНЦ РФ-ФЭИ разработок ускорительно-управляемых систем (УУС), в которых в качестве теплоносителя и материала мишени используется эвтектика свинец-висмут. Приведены технические характеристики изготовленного мишенного комплекса МК-1 для ускорителя протонов LANSCE (ЛАНЛ, США), рассмотрен прототип УУС для трансмутации младших актинидов, изложена концепция каскадной электроядерной установки с ускорителем электронов.

В последние 10–15 лет активно разрабатывается идея использования мощных ускорителей частиц в комбинации с подкритическими blankets. В качестве ускоряемых частиц чаще всего используются протоны. Ускорительно-управляемые (электроядерные) системы (УУС) рассматриваются как перспективные установки для целей трансмутации долгоживущих актинидов, утилизации плутония и получения энергии.

В России в этих работах активно участвуют научные коллективы Физико-энергетического института и других организаций, имеющих богатый опыт по созданию ядерных энергетических установок со свинцово-висмутовым теплоносителем. Научное руководство по разработке новых концептуальных проектов УУС осуществлял с самого начала и до 2001 г. профессор Б.Ф. Громов.

К настоящему времени разработан ряд проектов, демонстрирующих возможность применения свинцово-висмутового теплоносителя в УУС.

Одной из новых проблем при проектировании УУС является обоснование работоспособности мишени, в которой должно генерироваться максимальное число нейтронов и отводиться тепло, выделяющееся в процессе внутриядерного каскада в веществе мишени под действием протонного пучка. Наиболее подходящим материалом для мишени с большим энерговыделением являются тяжелые металлы в жидком состоянии: свинец, эвтектика свинец-висмут, т.к. в них при высоком выходе нейтронов проще организовать теплоотвод. Богатый опыт решения инженерных проблем получен при разработке, изготовлении и теплотехнических испытаниях пилотной жидкометаллической свинцово-висмутовой мишени на мощность пучка 1 МВт для ускорителя LANSCE Лос-Аламосской национальной лаборатории, США [1].

Большой объем проведенных научно-исследовательских работ позволил создать в 2003 г. концептуальный проект опытно-промышленного прототипа уско-

нительно-управляемого комплекса для трансмутации младших актинидов на площадке ГНЦ РФ-ФЭИ [2, 3]. Этот проект был в значительной мере инициирован предложениями профессора К. Руббиа, которые, к сожалению, не осуществились. Однако степень его проработанности позволяет надеяться на востребованность этого проекта в будущем.

Как альтернатива УУС с протонным пучком в 2005 г. рассмотрен ускорительно-управляемый комплекс с электронным ускорителем и каскадным бланкетом, позволяющим компенсировать сравнительно малый выход нейтронов в мишени на первичный электрон [4].

Ниже дан обзор характеристик основных разработанных проектов.

МИШЕННЫЙ КОМПЛЕКС МК-1 ДЛЯ ПУЧКА ПРОТОНОВ УСКОРИТЕЛЯ LANSCE (LANL, USA)

Конструкционная компоновка мишенного комплекса МК-1 в значительной степени была обусловлена требованиями на ее размещение в шахте внутри массива радиационной защиты на место ловушки пучка протонного ускорителя LANSCE. Оборудование МК-1 (собственно мишень, генерирующая нейтроны, МГД-насос, буферная емкость (БЕ), теплообменник (ТО), сливной бак (С.Б), устройство срыва сифона, трубопроводы, датчики и кабели системы управления и контроля (СКУЗ)) должны были вписаться в объем специальной прямоугольной несущей рамы размерами 640×710×4075 мм.

Разработанная компоновка МК-1 представлена на рис. 1, конструкция собственно мишени – на рис. 2.

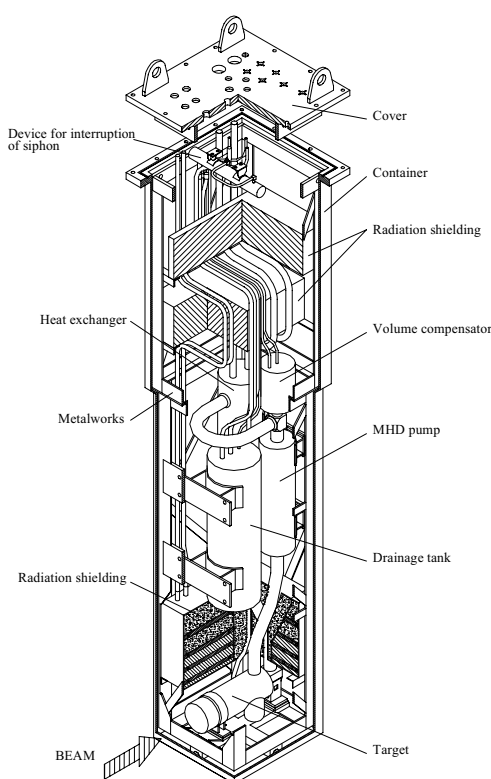


Рис. 1. Мишенный комплекс МК-1

Мишень имеет корпус 4, мембрану 1, внутренний канал 12 с диффузорной решеткой 10, входной 18 и выходной 14 патрубки теплоносителя. Длина мишени 660 мм, внутренний диаметр 185 мм.

Из входного патрубка холодный теплоноситель поступает в кольцевую входную камеру, затем в кольцевой канал между корпусом 4 и внутренним каналом 12, омывает мембрану и через отверстия диффузорной решетки, разогреваясь от пучка протонов, уходит по внутреннему каналу на выходной патрубок 14 и затем на теплообменник. Диффузорная решетка «прижимает» поток теплоносителя к мембране, тем самым обеспечивая ее надлежащее охлаждение.

Мембрана и диффузорная решетка мишени, находящиеся в наиболее высоких радиационных и тепловых полях, выполнены из жаростойкой ферритно-мартенситной стали ЭП-823, использовавшейся ранее как материал оболочки твэлов в реакторах, охлаждаемых свинцом-висмутом.

Корпус мишени и остальное оборудо-

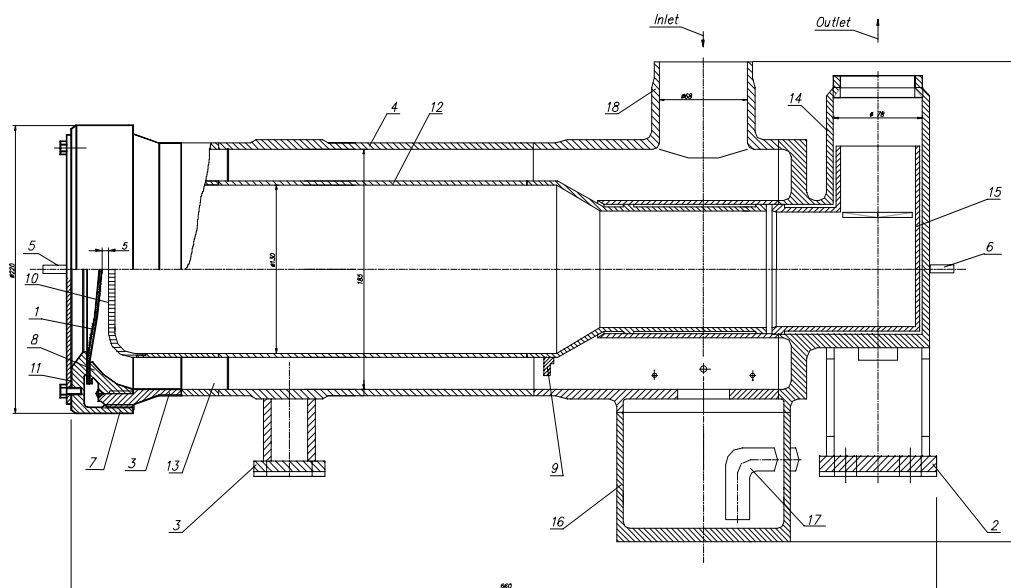


Рис. 2. Мишень: 1 – мембрана; 2 – опора неподвижная; 3 – опора подвижная; 4 – корпус наружный; 5 – штифт; 6 – штифт; 7 – крышка; 8 – переходник; 9 – экран; 10 – решетка перфорированная; 11 – крышка; 12 – корпус внутренний; 13 – дистанционная деталь; 14 – патрубок выходной; 15 – экран; 16 – емкость; 17 – труба; 18 – патрубок входной

дование МК-1 выполнены из нержавеющей стали 08Х18Р10Т.

Оборудование и трубопроводы МК-1 имеют электрический обогрев и снабжены (кроме собственно мишени) теплоизоляцией.

Для обоснования конструкции мишенного комплекса были выполнены многочисленные физические, теплогидравлические, прочностные расчеты. Кроме того, были выполнены расчеты толщин необходимой бетонной защиты при испытаниях МК-1 в пучке ускорителя LANSCE, выходы радионуклидов в газовую систему и их возможные поступления в экспериментальный зал при нормальной работе и аварийных ситуациях (радиационная безопасность).

Эти расчеты проводились для стационарных режимов, переходных режимов нормальной эксплуатации и аварийных режимов. Общая схема расчетов для мишени и контура представлена на рис. 3.

К стационарным режимам относятся стояночные режимы (МК-1 в холодном и горячем состоянии), режимы с циркуляцией теплоносителя без пучка и режимы работы на заданном уровне мощности.

Переходные режимы нормальной эксплуатации включают, в частности, в себя переходы из режимов с циркуляцией теплоносителя в стояночные режимы и наоборот, пусковые режимы со ступенчатым увеличением тока пучка. Однако наиболее важный переходный режим обусловлен спонтанными прерываниями пучка, когда, главным образом, из-за пробоев высоковольтной электроизоляции в инжекторе ток протонов резко падает и затем самопроизвольно восстанавливается. Анализ статистических данных по работе ускорителя LANSCE за 5 мес. 1997 г. дал следующую оценку [5]: за сутки работы около 30 прерываний пучка. Из них 74% прерываний имеют длительность менее 69 сек, 19% – длительность от 69 с до 10 мин и 7% – более 10 мин. Общее количество циклов, обусловленных прерываниями пучка, пусковыми и переходными режимами за срок службы мишенного комплекса было оценено в $8 \cdot 10^3$. Наиболее напряженными элементами оказались окно мишени и входной патрубок теплообменника. Расчетами показано, что обеспечи-

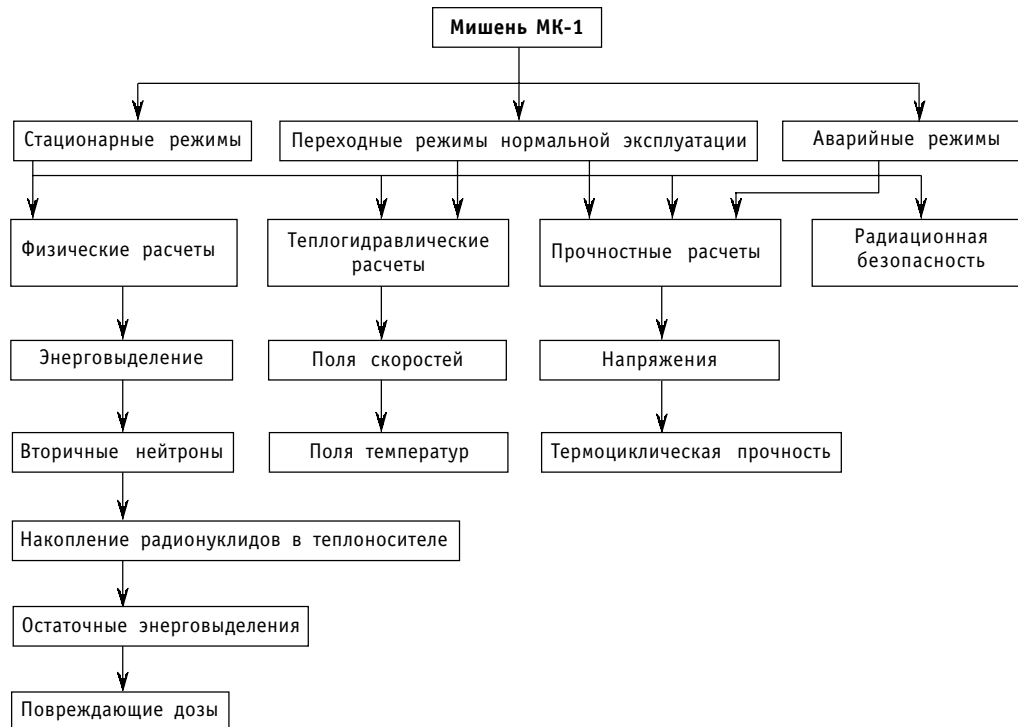


Рис. 3. Общая схема выполнения расчетов для мишени и циркуляционного контура МК-1

вается статическая и усталостная прочность всего оборудования МК-1.

Были оценены эффекты тонкой импульсной структуры пучка (пучок ускорителя LANSCE является серией трапецеидальных импульсов длительностью ~625 мкс, амплитудой ~20 мА (при мощности 1 МВт) и частотой ~100 Hz). Анализ показал, что импульсная структура пучка вызывает осцилляции температуры окна с амплитудой ~1% от средней величины, и в целом ее динамические эффекты являются слабыми, так что работу ускорителя на постоянном уровне мощности можно рассматривать как квазистационарную с непрерывным током.

В физических расчетах выходов нейтронов, энерговыведения, наработки продуктов скалывания, повреждающей дозы широко использовались программы LCS (LANET+MCNP4B) [6], MARS-10 [7] и КАСКАД 1.5 [8].

Теплогидравлические расчеты полей скоростей и температур в мишени выполнены с помощью расчетных кодов DUPT [9] и TUPT [10].

Прочностные расчеты были проведены для наиболее напряженных элементов мишени: окна, выходного и входного патрубков, сварных швов корпуса мишени и диффузорной решетки. Из оборудования МК-1 рассматривались теплообменник, буферная емкость, сливной бак, трубопроводы теплоносителя, воды и газа. Для расчета прочности использовались конечно-элементные коды, разработанные в ГНЦ РФ-ФЭИ и ОКБ «Гидропресс», в частности, код «FEMINA» [11].

В расчетах толщин внешней радиационной защиты, обеспечивающих радиационную безопасность, использовались программы метода Монте-Карло MARS-10, LCS и программа метода дискретных ординат КАСКАД 1.5.

Полученные проектные характеристики разработанного мишенного комплекса МК-1 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики МК-1

Наименование	Величина
Характеристики пучка протонов:	
- энергия протонов, МэВ	800
- ток протонов, мА	1,0
- эффективный диаметр пучка, мм	100
Характеристики мишени:	
- внутренний диаметр мишени, мм	185
- длина мишени, мм	660
- мощность тепловыделений в мишени, кВт	522
- выход нейтронов на один протон, н/п	18.5
- повреждающие дозы для окна, сна	30-40
- повреждающие дозы для диффузорной решетки, сна	37-45
- повреждающие дозы для корпуса мишени, сна	1.6-2.4
- повреждающие дозы для стенки контейнера, сна	0.6
- максимальные значения образования гелия и водорода, аррм в мишени	2370, 16200
- максимальные значения образования гелия и водорода, аррм в диффузорной решетке	2200, 19200
- температура теплоносителя, °С	
на входе в мишень	232
на выходе из мишени	319
- расход сплава через мишень, м ³ /ч	14,2
Характеристики насоса:	
- производительность, м ³ /ч	15
- полезный напор, МПа	0,102
- коэффициент полезного действия, %	8,1
- частота тока, Гц	60
- напряжение питания, В	220
- потребляемая мощность, кВт	5,3
- коэффициент мощности	0,29
Характеристики теплообменника:	
- тепловая мощность, кВт	до 600
- расход охлаждающей воды, м ³ /ч	27,4
- температура охлаждающей воды, °С	
на входе	200
на выходе	218
- давление охлаждающей воды, МПа	3,5
Характеристики охлаждения блока защиты:	
- расход охлаждающей воды, м ³ /ч	2,7
- температура охлаждающей воды на входе, °С	25
- средний подогрев охлаждающей воды, °С	7
- давление охлаждающей воды, МПа	2
Характеристики электропитания системы электрообогрева:	
- напряжение, В	220
- частота тока, Гц	60
- номинальная мощность, кВт	17,5
Масса мишенного комплекса с внутренней радиационной защитой и теплоносителем, в пределах герметичного контейнера, кг	5700
Масса теплоносителя, кг	684
Срок службы мишенного комплекса с момента его поставки в ЛАНЛ, мес.	30
Общее время эксплуатации мишенного комплекса с теплоносителем в контуре циркуляции не более, мес.	15
Общее время эксплуатации мишенного комплекса под пучком протонов не более, ме.с	12
Интегральная доза облучения мишени пучком протонов не более, мАхмес.	7,5
Общая удельная активность теплоносителя, Бк/кг:	
- к концу эксплуатации,	2.9·10 ¹³
- спустя 1 год,	2.12·10 ¹¹
Полное остаточное энерговыделение в контуре мишени, Вт:	
- на момент остановки,	4100
- через 1 мес.	130

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ ПРОТОТИП УСКОРИТЕЛЬНО-УПРАВЛЯЕМОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ТРАНСМУТАЦИИ МЛАДШИХ АКТИНИДОВ НА ПЛОЩАДКЕ ГНЦ РФ-ФЗИ

Для проектных проработок были приняты следующие исходные данные: тепловая мощность blankets ~ 100 МВт, параметры протонного пучка: $E_p \sim 500\text{--}700$ МэВ, мощность $\sim 2\text{--}3$ МВт, скорость выжигания младших актинидов $\sim 10\text{--}15$ кг/год. Материал мишени и теплоноситель blankets – эвтектический сплав свинца и висмута.

В международной кооперации предполагалось, что за разработку, создание ускорителя и модуля транспортировки протонного пучка к мишени возьмутся европейские организации, российская сторона выполнит разработку и создание мишенно-blankетного комплекса.

Разработанная схема ускорительно-управляемого комплекса, дающая представление о его компонентах, приведена на рис. 4.

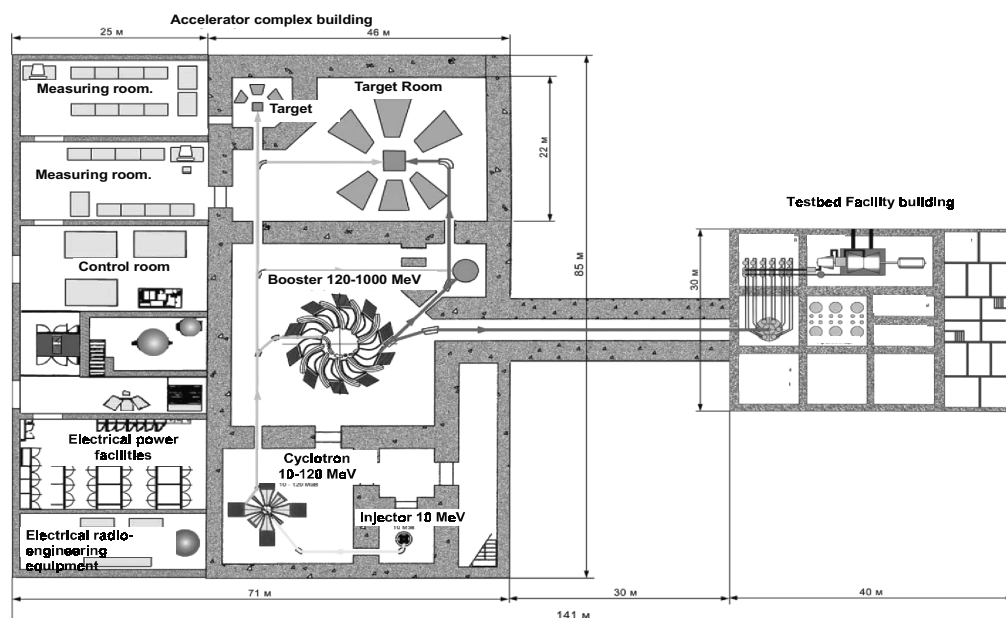


Рис. 4. Схема ускорительно-управляемого комплекса

В большом здании находится ускоритель, состоящий из инжектора протонов, циклотрона на энергию частиц $10\text{--}120$ МэВ, бустера, разгоняющего частицы до $120\text{--}1000$ МэВ, и вся необходимая для работы ускорителя инфраструктура. В соседнем здании размещается подкритический реактор с мишенным комплексом и необходимым оборудованием.

Мишенно-blankетный модуль имеет баковую моноблочную конструкцию, включающую в себе весь первый контур с теплообменным оборудованием (теплообменники первого-второго контуров, циркуляционные насосы, устройства системы технологии теплоносителя и др.), внутрикорпусную радиационную защиту, blanket и собственно мишень. Доставка протонного пучка к мишени осуществляется по вертикальному каналу, проходящему через крышку реакторного модуля.

В качестве прототипа мишени можно рассматривать описанный выше мишенный комплекс МК-1. Состав и характеристики blankets выбирались так, чтобы обеспечить требуемую мощность и скорость выжигания.

Для рассматриваемого бланкета выбраны конструкция и решетка твэлов, хорошо изученные при создании российских реакторов, охлаждаемых свинцово-висмутовым теплоносителем. Как основной элемент активной зоны принят стержневой твэл, представляющий собой заполненную топливной композицией тонкостенную трубку из феррито-мартенситной стали с 4 винтовыми внешними ребрами. Внешний диаметр оболочки 12 мм, толщина 0,4 мм. Твэлы образуют в активной зоне треугольную решетку. Шаг решетки определяется внешним диаметром окружности ребер с учетом зазора между ребрами и составляет 13,6 мм.

Бланкет имеет кассетную конструкцию, что обеспечивает работу установки в режиме частичных перегрузок, важном в организации выжигания МА. Количество твэл в ТВС равно 19; 246 указанных ТВС обеспечивают необходимую тепловую мощность бланкета 100 МВт.

С учетом необходимости размещения канала мишени описанный диаметр бланкета оценивается величиной $D_{оп} \approx 1140$ мм. Со стороны боковой поверхности бланкет окружается стальным отражателем толщиной ~ 250 мм, за которым располагаются защитные экраны.

Одним из параметров, ограничивающих содержание МА в топливе является собственное энерговыделение в «свежем» топливе с МА за счет радиоактивного распада ядер младших актинидов. При выборе топлива принято ограничение по этому параметру $0,2$ Вт/см³, при котором температура поверхности твэла в условиях свободной конвекции воздуха не будет превышать ~50–60°C. С учетом этого факта рассмотрены 3 варианта бланкета, в который загружаются два типа топлива – «базовое» топливо и топливо с МА. В качестве «базового» топлива принят диоксид урана UO_2 с эффективной плотностью $9,65$ г/см³.

Вариант 1

МА выжигаются в виде их смеси из ОЯТ ВВЭР после 15 лет хранения. Эта смесь обладает значительным собственным энерговыделением. Максимальная плотность МА в топливной композиции, при которой их собственное энерговыделение в твэле будет не более $0,2$ Вт/см³; равна $\gamma_{МА} = 2,2$ г/см³. Принято, что в данном случае топливо представляет собой диоксид МА в матрице из ZrO_2 с объемным содержанием диоксида МА ~ 22%. В этом варианте 108 ТВС с МА заполняют в бланкете первые 4 ряда, окружающие канал мишени. Остальные 138 ТВС содержат твэлы с «базовым» топливом с обогащением ~35% по урану-235.

Вариант 2

МА выжигаются в составе того же топлива, что в варианте 1, и с тем же количеством ТВС. Однако 108 ТВС с МА и 138 ТВС с «базовым» топливом равномерно расставлены по сечению бланкета. В этом случае для выравнивания радиального распределения мощности обогащение «базового» топлива по урану-235 увеличивается от центра к периферии бланкета.

Вариант 3

МА выжигаются в виде смеси нептуния и америция. Поскольку ^{241}Am обладает заметным энерговыделением, плотность америция в топливной композиции ограничивается величиной $\gamma_{Am} = 2,2$ г/см³. Плотность нептуния, практически не дающего вклада в энерговыделение, определяется из соображений обеспечения требуемой подкритичности бланкета и выравнивания поля энерговыделения. Принято, что топливо представляет собой смесь диоксидов NpO_2 (36 об.%) и AmO_2 (20 об.%) в циркониевой матрице. В этом варианте 42 ТВС с МА заполняют в бланкете первые 2 ряда, окружающие канал мишени. Остальные 202 ТВС содержат твэлы с «базовым» топливом с обогащением по урану-235, увеличивающимся к периферии бланкета.

Для этих трех видов топлива расчетным путем определены умножение $M_{\text{бл}}$ по нейтронам, определена требуемая мощность источника, оценен темп выжигания МА при рассмотренных загрузках. Основные полученные характеристики мишенно-бланкетного модуля представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики мишенно-бланкетного модуля для трансмутации младших актинидов

Параметр, размерность	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
"Базовое" топливо	$\text{UO}_2 \gamma_{\text{эфф}} = 9,65 \text{ г/см}^3$					
Обогащение по ^{235}U , %	~ 35		22, 25.5, 38		18.5, 21, 25.5	
Количество ТВС с «базовым» топливом	138				202	
Размещение ТВС с «базовым» топливом	во внешних рядах бланкета		равномерно по сечению бланкета		во внешних рядах бланкета	
Загрузка по урану, кг	2375				2924	
Топливо с МА	диоксид МА + ZrO_2				$\text{AmO}_2 + \text{NpO}_2 + \text{Zr}$	
Количество ТВС с МА	108				42	
Размещение ТВС с МА	во внутренних рядах бланкета		равномерно по сечению бланкета		во внутренних рядах бланкета	
	$T = 0$	$T = 1 \text{ год}$	$T = 0$	$T = 1 \text{ год}$	$T = 0$	$T = 1 \text{ год}$
Загрузка МА, кг	400	386,9	400	384,9	400	384,5
Умножение в бланкете $M_{\text{бл}}$	30,79	20,311	29,643	24,552	29,39	30,143
$K_s = M_{\text{бл}} / (M_{\text{бл}} + 1)$	0,9685	0,9531	0,9674	0,9609	0,9671	0,9679
Мощность внешнего источника, н/сек	$2,53 \cdot 10^{17}$	$3,85 \cdot 10^{17}$	$2,63 \cdot 10^{17}$	$3,18 \cdot 10^{17}$	$2,65 \cdot 10^{17}$	$2,59 \cdot 10^{17}$
Выжигание МА за 1 год, кг	13,1		15,1		15,5	
Удельное выжигание МА, г/МВт-сут	~ 0,36		~ 0,41		~ 0,43	
Наработка ^{238}Pu за 1 год, кг	9,8		10,1		9,9	

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОЦЕЛЕВОЙ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ПОДКРИТИЧЕСКОГО КАСКАДНОГО РЕАКТОРА, УПРАВЛЯЕМОГО УСКОРИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОНОВ

Для разработки была принята концепция электроядерной установки, состоящей из ускорителя электронов, нейтронопроизводящей мишени и двухзонного подкритического бланкета (см. рис. 5). В такой концепции высокоэнергетичные электроны, взаимодействуя с материалом мишени (жидкий Pb–Bi), генерируют нейтроны, которые затем каскадно умножаются в двухзонном подкритическом бланкете. Использование каскадного умножения нейтронов в данном случае необходимо для снижения требований к мощности электронного пучка.

Параметры пучка электронов были выбраны в соответствии с заявляемыми в настоящее время характеристиками для перспективных линейных ускорителей [12]: энергия электронов $E=50$ МэВ; сила тока $I=80$ мА; мощность пучка электронов $W=4$ МВт.

Безоконная мишень расположена в центре системы и представляет собой трубу с внешним диаметром 18 см, по которой протекает сплав свинец-висмут. Уровень сплава в центральном канале, на который подается сверху пучок электронов, находится ниже верхнего торца установки на 12 см, высота сплава 40 см. Выход нейтронов в такой мишени на один электрон с энергией 50 МэВ равен $\gamma_{\text{n}}^{\text{tot}} = 0.063$ нейт/электрон.

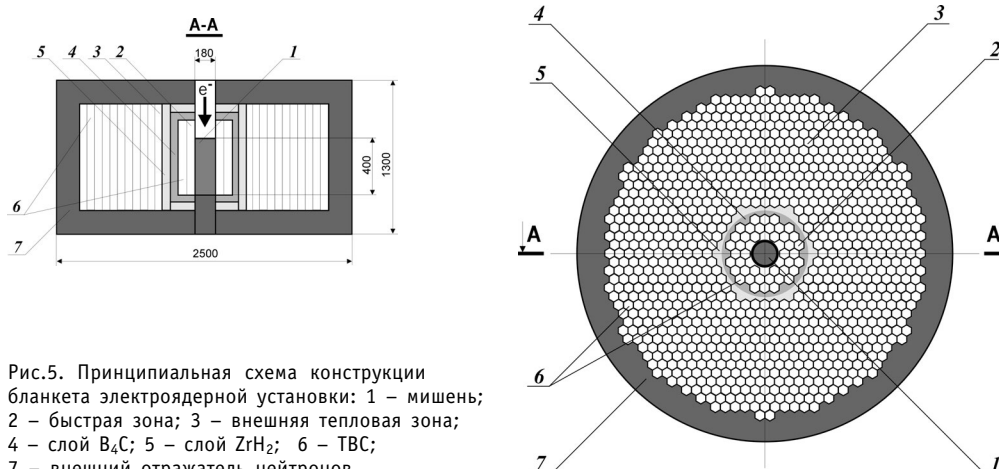


Рис.5. Принципиальная схема конструкции blankets электроядерной установки: 1 – мишень; 2 – быстрая зона; 3 – внешняя тепловая зона; 4 – слой B_4C ; 5 – слой ZrH_2 ; 6 – ТВС; 7 – внешний отражатель нейтронов

Подкритический двухзонный blanket состоит из внутренней зоны с быстрым спектром нейтронов и внешней – с тепловым. Между внешней и внутренней зонами установлен специальный «вентильный экран» из B_4C-ZrH_2 , который уменьшает влияние нейтронов тепловой зоны на быструю по сравнению со случаем, когда поглощающий нейтроны материал в экране отсутствует.

В качестве основного тепловыделяющего элемента размножающих зон blanket был принят стержневой ТВЭЛ, традиционно использующийся в проработках реакторных установок с теплоносителем $Pb-Bi$ и представляющий собой заполненную топливной композицией тонкостенную стальную трубку с винтовыми внешними ребрами. Кассетная конструкция blanket с очехлованными тепловыделяющими сборками (ТВС) обеспечивает работу установки в режиме частичных перегрузок. В качестве топлива в быстрой зоне используется высокообогащенный диоксид урана UO_2 , в тепловой зоне – топливная композиция на основе гидрида циркония и уран-циркониевого сплава. Охлаждается как быстрая, так и тепловая зоны blanket жидкометаллическим теплоносителем $Pb-Bi$. Снаружи реактор окружен отражателем из $Pb-Bi$ толщиной 20 см.

«Вентильный экран», состоит из слоя карбида бора с обогащением по изотопу ^{10}B 50%, толщиной ~2,4 см и слоя гидрида циркония толщиной ~4,8 см. Как показали расчеты, такой экран отражает со стороны быстрой зоны около 30% нейтронов (93% из них имеют энергию больше 0,1 МэВ) и пропускает около 42% нейтронов в тепловую зону с существенным смягчением спектра (15% из прошедших нейтронов имеют энергию меньше 4,6 эВ). В обратном направлении со стороны внешней зоны доля прошедших нейтронов во внутреннюю зону составляет ~17%, из них нейтронов с энергией меньше 4,6 эВ примерно 0,3%.

В проработках принято, что проектное значение эффективного коэффициента размножения системы должно быть равно $K_{эфф} \approx 0.980$.

Мощность установки при входной мощности пучка электронов 4 МэВ равна ~50 МВт, 27,6% из которых выделяется в быстрой зоне blanket, 72,4% – в тепловой. Средний нейтронный поток в быстрой зоне составляет $3,8 \cdot 10^{14}$ н/см²с, в тепловой – $6,0 \cdot 10^{13}$ н/см²с.

Таким образом, система обеспечивает выигрыш (усиление) по энергии примерно в 12 раз, из них за счет каскадности – примерно в 3 раза.

Рассматриваемая установка имеет следующие теплогидравлические параметры:

- входная температура теплоносителя $T_{вх} \sim 310$ °С;
- выходная температура теплоносителя $T_{вых} \sim 475$ °С;
- максимальная температура оболочки твэла $T_{об}^{max} \sim 600$ °С;
- средняя скорость теплоносителя в быстрой зоне $W_{ср}^b \sim 1,5$ м/с;
- средняя скорость теплоносителя в тепловой зоне $W_{ср}^T \sim 0,19$ м/с.

В настоящее время в ГНЦ РФ-ФЭИ работы по УУС со свинцом–висмутом активно продолжаются в кооперации с другими организациями.

Литература

1. Gromov B., Yefimov E., Leonchuk M., Orlov Yu., Troyanov V., Pankratov D., Reshetnikova O., Kononenko G., Ignatiev S., Stepanov V., Kutanov V., Klimov N., Gudowski W., Wender S. and Woloshun K. Development of Molten Lead-Bismuth Target Complex TC-1 for the LANSCE-Accelerator/ ANS Topical Meeting, Reno, November 11-15, 2001.
2. Rubbia C., Pavlopoulos N., and Zrodnikov A. Nuclear Waste Burner (NWB) – An ADS Industrial Prototype For Minor Actinides Elimination/TOF Winter School on Astrophysics, ADS, and First Results, Les Houches, France, February 24-28, 2003.
3. Zrodnikov A., Gulevich A., et al. Nuclear Waste Burner for Minor Actinides Elimination// Progress in Nuclear Energy. – V. 47. – № 1-4. – P. 339-346.
4. Гулевич А.В., Земсков Е.А., Комлев О.Г., Кухарчук О.Ф., Мельников К.Г., Новикова Н.Н., Фокина О.Г., Чекунов В.В. Концепция многоцелевой электроядерной системы на базе подкритического каскадного реактора, управляемого ускорителем электронов (в печати).
5. Yefimov E.I., Leonchuk M.P., Pylchenkov E.Kh. et al. Impact of the LANSCE Accelerator Beam Trips on Pilot Molten Lead-Bismuth Target Design NEA/OECD Workshop. Aix-en-Provence, France, Nov.22-24, 1999.
6. Prael R.E., Lichtenstein H. User Guide to LCS: The LANHET Code System, LANL, Revised Sept.15, 1989.
7. Mokhov N.V. The MARS10 Code System: Inclusive Simulation of Hadronic and Electromagnetic Cascades and Muon Transport. Fermi National Accelerator Laboratory, FN-509, 1989.
8. Волощенко А.М., Швецов А.В. КАСКАД 1.5 – Программа для решения уравнения переноса нейтронов, фотонов и заряженного излучения в двумерных геометриях/Сборник тезисов докладов VII Российской конф. «Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок» (Обнинск, 22-25 сентября 1988).
9. Леончук М.П., Сивак З.В. Программа расчета тепломассообмена в односвязных и многосвязных областях с неоднородными свойствами среды/Препринт ФЭИ-1706, Обнинск, 1985.
10. Grishakov S., Leonchuk M. Updated methods of three-dimensional analysis of hydrodynamics of nuclear reactor coolant path in (r,φ,z)-geometry/Preprint IPPE-2384. – Obninsk, 1994.
11. Хмелевский М.Я. и др. Конечно-элементный программный комплекс FEMINA (двумерная термомеханика)/Препринт ФЭИ-2602. – Обнинск, 1997.
12. Ridikas D., Safa H., Bernardin B. A Prototype Compensated Reactor (BCR) Driven by Electron Accelerator. – PHYSOR-2002, Korea, October 7-10, 2002.

Поступила в редакцию 1.09.2006

УДК 621.039.534

Temperature Regimes of Pins for Ship Nuclear Reactors with Liquid-Metal Cooling \ A.V. Zukov, A.P. Sorokin, A.D. Efanov, J.A. Kuzina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 13 pages, 11 illustration. – References – 18 titles.

Results of complex thermohydraulic researches obtained for reactor cores with liquid-metal coolant are stated taking into account specific characteristics of alloy Pb-Bi used as coolant for nuclear reactors. Methods and techniques of studying of temperature and velocity fields in the model assemblies developed on the basis of methods of thermal modeling are considered. Experimental data on heat transfer and maximal temperature non-uniformities in regular pin lattices and in non-standard channels are presented. Recommendations for calculation of local and average factors of mass and heat exchange (convective component) for wire wrapped pins («an edge on an edge») are given. The effects caused by deformation, spacer devices and partial blocking of through passage section in pin lattices cooled by liquid metal are considered.

УДК 621.039.534

Conceptual Development Works of the Accelerator-Driven Systems with Lead-Bismuth Coolant \ E.A. Zemskov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 10 pages, 2 tables, 5 illustrations. – References – 12 titles.

A brief review of realized at SSC RF-IPPE designs of the accelerator-driven systems (ADS) using lead-bismuth eutectic as a coolant and target is presented. The technical characteristics of manufactured target complex MK-1 for proton accelerator LANSCE (LANL, USA) are given. The prototype model of the ADS for transmutation of minor actinides is considered. The concept of a cascade electro-nuclear installation with an accelerator of electrons is posed.

УДК 621.039.52

The State and Problems of Computation-Methodical Support of Designed Reactor Installations with Lead-Bismuth Coolant \ O.G. Komlev, N.N. Novikova, M.M. Tregoda, E.V. Filimonov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 13 pages, 1 illustration. – References – 15 titles.

The paper presents a brief review of the state and basic problems of computation-methodical support of designing the reactor installations with lead-bismuth coolant regarding validation of neutron-physical, thermal-hydraulic and radiation characteristics.

УДК 621.039.534

Coagulation Model of Bubbles Injected by Jet Injector into Heavy Liquid Metal Flow \ V.S. Fedotovskiy, T.N. Verestchagina, Yu.I. Orlov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2007. – 11 pages, 4 illustrations. – References – 8 titles.

A mathematical model of bubbles coagulation in the process of outflow of fine-dispersed gas-liquid flow from the jet injector into the channel with coolant flow is presented. The model allows estimating the efficiency of the injector method for gas mixture injection into heavy liquid metal coolant with the technological aim. Mechanisms of gradient, inertial and turbulent coagulations resulting in an evolution of the bubbles sizes spectrum along the channel are considered. Computation dependences of the bubbles sizes spectrums, an average bubble size and the size of specific interphase surface on the distance from the injector are presented.

УДК 621.039.51

Experimental and Numerical Investigations into Thermalhydraulics of the Model of Liquid Metal-Cooled Target System TS-1 \ G.P. Bogoslovskaya, A.D. Efanov, E.F. Ivanov, Yu.D. Levchenko, Yu.I. Orlov, A.P. Sorokin, V.S. Fedotovskiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy.