

УДК621.384.6.01.

РЕЦИРКУЛЯТОР "SALO" - ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ МОДЕЛИ ПОДКРИТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА, УПРАВЛЯЕМОГО УСКОРИТЕЛЕМ

**В.В. Ганн*, И.С. Гук*, А.Н. Довбня*, С.Г. Кононенко*, А.С. Костромин*, Ф.А. Пеев*,
И.М. Прохорец*, С.А. Солдатов*, А.С. Тарасенко*, М. van der Wiel**, J.I.M. Botman****

*ННЦ ХФТИ, Харьков, Украина

E-mail: guk@kipt.kharkov.ua.

**ТУЭ, Эйндховен, Нидерланды

Поступила в редакцию 30 декабря 2005 г.

В последнее время активно обсуждаются возможности создания установок с подкритическими реакторами, управляемыми ускорителями частиц. На начальной стадии этих исследований наиболее целесообразно использовать ускорители электронов, поскольку стоимость такой установки будет значительно меньше, чем при использовании протонных пучков. При этом можно будет изучать все физические процессы, происходящие при совместной работе ускорителя и подкритической сборки. В работе рассмотрен специальный режим работы рециркулятора "SALO" в составе модели будущих энергетических установок. Описан канал транспортировки пучка к мишени и требования к стабильности параметров пучка на нейтронопроизводящей мишени. Приведены несколько вариантов конструкции подкритической сборки на основе низкообогащённого урана.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рециркулятор, подкритическая сборка, ускоритель электронов

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одной из важнейших проблем ядерной энергетики является проблема безопасности. Одним из возможных путей повышения безопасности будущих ядерных энергетических установок является использование подкритических ядерных реакторов, управляемых ускорителями с нейтронопроизводящими мишенями. Основные предложения по созданию таких установок связывают с использованием ускорителей протонов [1-3].

Протоны с энергиями более 300 МэВ выбивают нейтроны из тяжёлых ядер в результате каскадных процессов и испарения, причём выход нейтронов на один протон велик. Так протон с энергией 600 МэВ порождает в толстой мишени из Pb или W 10-12 нейтронов, а в мишени из U – 25 нейтронов, имеющих широкий спектр энергий.

Наиболее перспективным видом ускорителя в настоящее время считается линейный ускоритель протонов, поскольку он позволяет получить наибольший ускоренный ток [4,5]. Для эффективной работы установки энергия протонов должна быть в диапазоне 1-1,7 ГэВ. Основная проблема при использовании протонных ускорителей – сильная активация оборудования и высокая стоимость ускоряющего комплекса.

Основными механизмами образования нейтронов электронами с энергией около 100 МэВ в уране и других тяжёлых ядрах являются фотоядерные реакции (γ, n), ($\gamma, 2n$) и реакция фотоделения. Выход нейтронов на один ускоренный электрон на уране при этом близок к 0,1. Однако последнее время активно обсуждаются возможности использования электронных ускорителей для создания нейтронных источников с подкритическими сборками, при этом показано, что до потоков 10^{17} нейтронов за секунду более эффективным с точки зрения капитальных затрат является использование электронных ускорителей [6]. В 2005 году в Харькове был проведен украинско-американский семинар «Установка с подкритической сборкой, управляемая ускорителем частиц» [7], на котором всесторонне обсуждалась проблема использования электронного ускорителя с непрерывным пучком для реализации модели энергетической подкритической установки, управляемой ускорителем.

Такая установка должна состоять из ускорителя электронов, системы транспортировки пучка к мишени, нейтронообразующей мишени, задачей которой является получение максимального потока нейтронов и подкритической сборки из топливных элементов.

В настоящей работе рассмотрены возможности использования проектируемого в ННЦ ХФТИ ускорительного комплекса "SALO" для работы в составе нейтронного источника, а также результаты моделирования активной зоны установки на основе топливных элементов типа WWR и на основе модифицированных топливных элементов реактора типа ВВЭР-1000, выполненного с помощью двух программ: MCNP и SCALE 5. Рассмотрены варианты использования топлива с низкой и высокой степенью обогащения.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУЧКА РЕЦИРКУЛЯТОРА "SALO" ДЛЯ СОЗДАНИЯ НЕЙТРОННОГО ИСТОЧНИКА

Как показано в работе [7 с. 67], для создания будущей установки желательно иметь пучок электронов с энергией 100-200 МэВ и мощностью в пучке около 100 кВт. Такие параметры пучка можно будет получить в ускоряющей структуре TESLA, которую предполагается использовать в рециркуляторе "SALO" [8], проект которого разрабатывается в ННЦ ХФТИ.

Экспериментальные данные, полученные на ускорителе ELBE, показали, что ускоряющая структура TESLA позволяет ускорять пучки со средним током до 1 мА при ускоряющем градиенте 10 МВ/м [8]. В этом режиме прирост энергии в ускоряющей структуре рециркулятора составит 120 МэВ.

Разрабатываемый для ELBE сверхпроводящий инжектор [9], который предполагается использовать в качестве прототипа при создании инжектора неполяризованных электронов [8], имеет два режима работы: режим с большим зарядом в банче (до 1 нанокюлонов, 1 МГц) и режим с частотой посылок 13 МГц и зарядом в банче-77 пикокюлонов. На обычной мишени из природного урана с помощью инжектора с такими параметрами можно получить поток до $8,9 \cdot 10^{14}$ нейтронов за секунду при энергии электронов 130 МэВ. Длительность импульса быстрых нейтронов не будет существенно превышать 40 пикосекунд при не очень толстой мишени, а число нейтронов в импульсе будет около $\sim 6 \cdot 10^8$.

При использовании этого инжектора расчётный эмиттанс пучка на выходе ускоряющей структуры не будет превышать $0,12 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, а энергетический разброс – $4,6 \cdot 10^{-4}$.

При выбранном расположении комплекса «SALO» в существующих капитальных сооружениях [8], мишень с подкритической сборкой можно разместить в специальном корпусе, расположенном на расстоянии около 100 м от рециркулятора (см. рис.1). Комплекс мишеней будет состоять из «быстрой» мишени из урана или другого материала с большим зарядом ядра и размножающей мишени, представляющей собою подкритическую сборку из обогащённого урана и нейтронообразующей мишени из природного урана или вольфрама. «Быстрая» мишень предназначена для работ с времяпролётной методикой, а размножающая мишень будет генерировать квазинепрерывный поток нейтронов большой интенсивности.

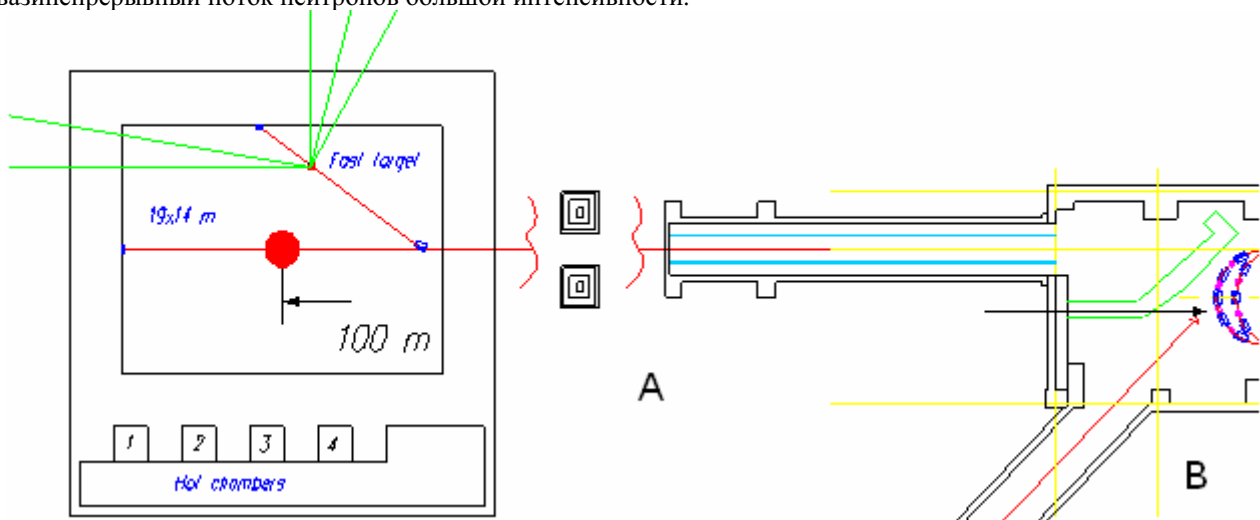


Рис.1. Размещение комплекса мишеней. А и В – существующие залы перегрузки и мишени.

На рис. 2 представлена схема магнитооптической системы источника нейтронов с размножающей мишенью. В ней можно выделить три основных участка: 1) инжектор и тракт инжекции; 2) ускоряющая структура и первая полуарка рециркулятора; 3) тракт транспортировки пучка электронов к размножающей мишени и саму мишень. Первые два участка являются частью рециркулятора, в то время как третий участок принадлежит лишь источнику нейтронов. Из-за того, что в нейтронообразующей и размножающей мишени для охлаждения и в качестве замедлителя будет использоваться вода, ввод электронов на мишень должен осуществляться по вертикали. При использовании для этой цели двух дипольных магнитов (см. рис. 3) для обеспечения работы с подкритической сборкой, которая будет располагаться в специальном корпусе с водой, нейтронообразующую мишень необходимо располагать на 3 м ниже плоскости орбиты рециркулятора [7 с.197]. Система квадруполей перед диполями позволяет формировать на мишени пучок электронов с размерами около 5 см. При использовании для формирования пучка на мишени квадруполей, расположенных после диполей (см. рис.4), можно уменьшить размеры пучка в диполях с 4-7 мм (рис.5) до 0,4 мм (рис.6), однако это приведёт к заглоблению мишени ещё более, чем на один метр.

Из-за большой мощности пучка (около 130 кВт) его положение и размеры на мишени не должно меняться более, чем на 5 мм, а система управления должна отключать пучок при большей амплитуде колебаний.

Указанные требования и большая (~100 м) пролетная база обуславливают довольно жесткие требования к стабильности питания магнитных элементов, точности их юстировки и коррекции траектории пучка, а также к допустимым амплитудам механических вибраций электромагнитных элементов. Моделирование влияния указанных факторов показало, что необходимая стабильность размеров пучка и его положения на мишени может быть получена при относительной стабильности питания магнитных элементов $\sim 10^{-4}$ и допустимой механической вибрации электромагнитных элементов $< 10^{-2}$ см на каждую степень свободы. Возможные неточности юстировки электромагнитных элементов рециркулятора при монтаже могут быть скомпенсированы системой коррекции положения пучка.

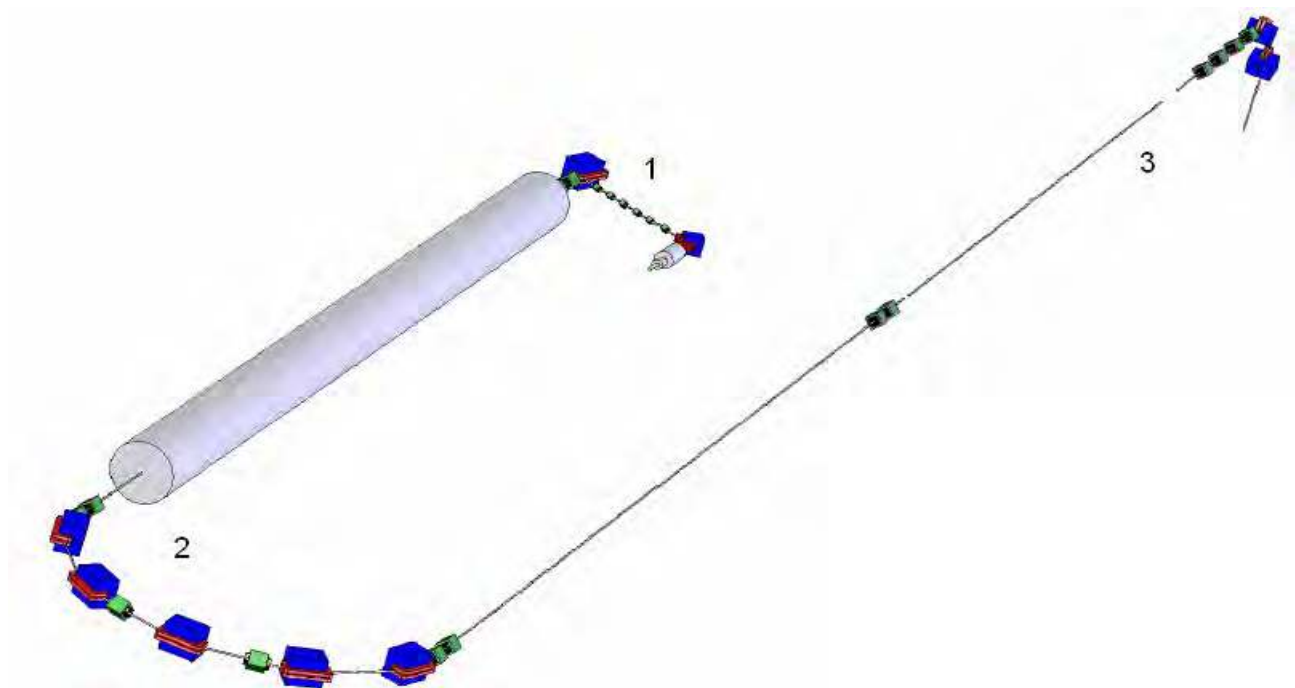


Рис. 2. Схема магнитооптической системы

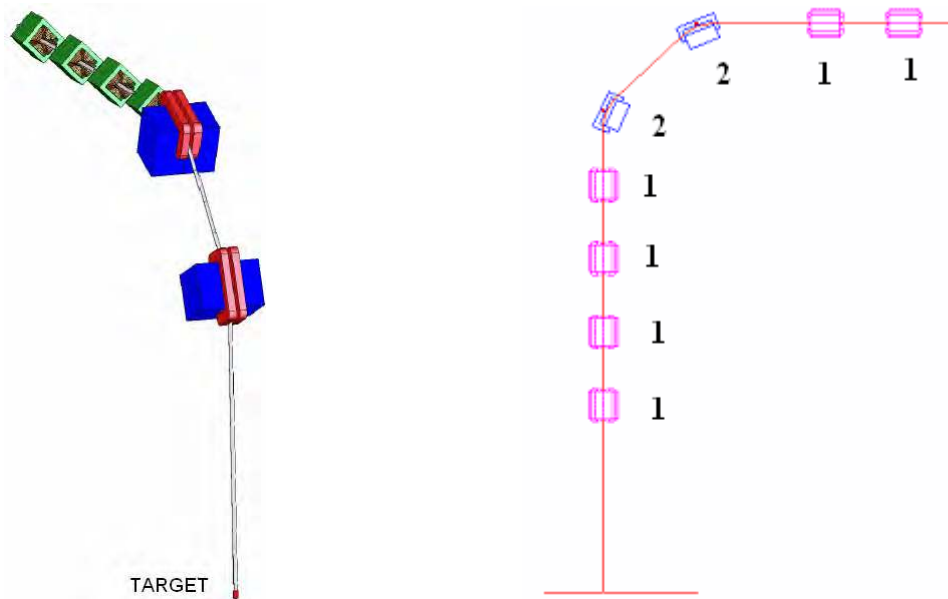


Рис. 3. Ввод электронов на мишень

Рис.4. Система фокусировки пучка на мишень, 1- квадруполи, 2 – диполи.

РАСЧЕТ КРИТИЧНОСТИ И ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ С ГОМОГЕННОЙ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКОЙ И С WWR-M2 ТОПЛИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Подкритическая ядерная сборка, управляемая ускорителем электронов или других заряженных частиц, имеет две главные составляющие – нейтронопроизводящую мишень и реакторную сборку, в которой происходит усиление потока нейтронов из мишени. Подкритическая сборка работает на основе деления ядер ^{235}U , входящего в ее состав. В теории реакторов для характеристики системы, в которой происходит цепная реакция, используется коэффициент размножения K_{eff} . Он представляет собой отношение числа нейтронов деления двух последовательных поколений нейтронов. Для подкритических систем $K_{eff} < 1$, что говорит о том, что реакция деления в системе с делящимися элементами прекращается с течением времени. Поэтому для вычисления K_{eff} необходимо знать среднее число нейтронов деления, которые возникают в одном поколении;

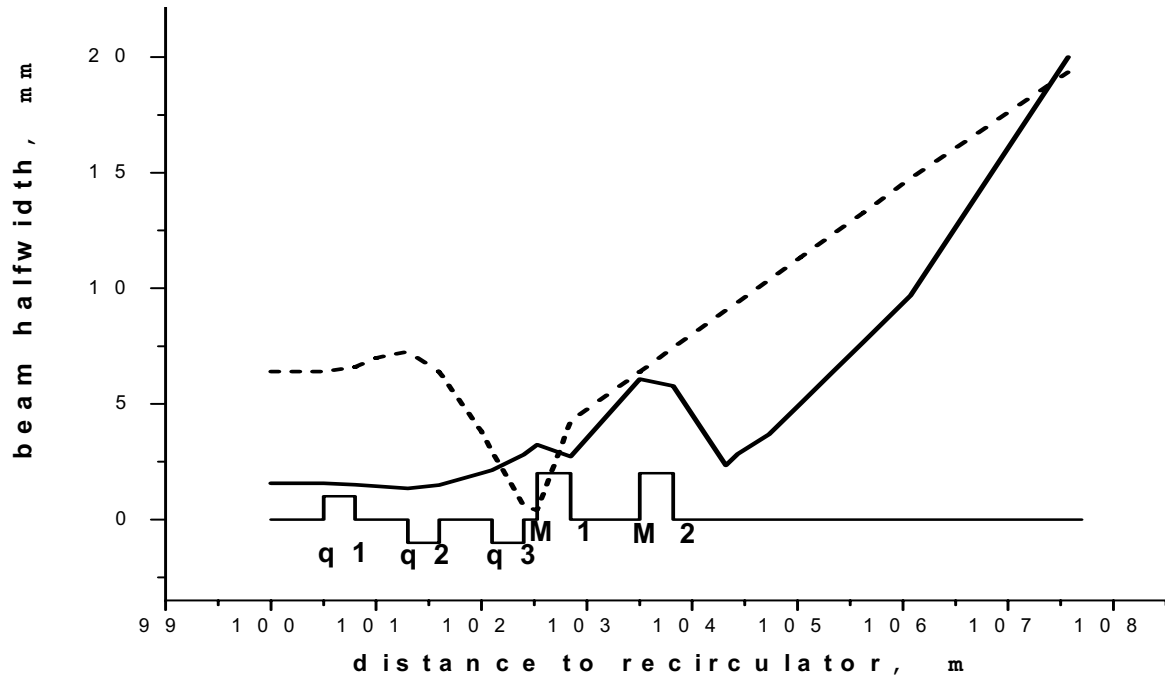


Рис.5. Размеры пучка в тракте поворота

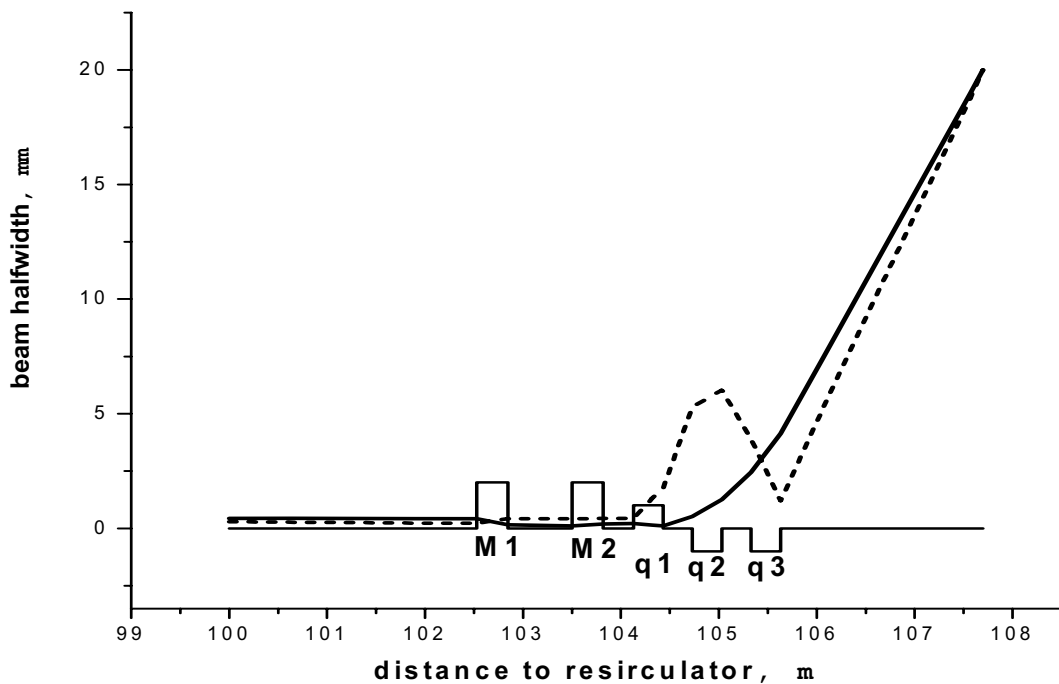


Рис.6. Размеры пучка в тракте поворота с дополнительными квадрупольями

относительно одного захваченного нейтрона. Под поколением нейтронов понимают жизнь нейтрона от его рождения в процессе деления до его исчезновения в результате паразитного захвата, выхода из объема или поглощения, которое ведет к делению. В программе MCNP вычислительным эквивалентом генерации нейтронов деления есть цикл K_{eff} (K_{eff} cycle). Для этого нейтроны деления отслеживаются в каждом цикле для того, чтобы определить источник нейтронов для следующего цикла. Влияние запаздывающих нейтронов учитывается при использовании среднего числа нейтронов деления $\bar{\nu}$. Спектр запаздывающих нейтронов деления считается таким же, как и для мгновенных нейтронов деления.

Гомогенная подкритическая ядерная сборка, то есть сборка с однородным ядерным делящимся материалом, с многих точек зрения может считаться простейшим источником нейтронов. Для моделирования параметров такой сборки предположим, что подкритическая сборка высотой H и диаметром D заполнена UO_2 в алюминиевой матрице. Кроме этого, предположим, что источник нейтронов, характеризуемый спектром Ватта, нахо-

дится в центре сборки. Были проведены расчеты для обогащения материала подкритической сборки ^{235}U до уровня 90% (подкритическая сборка с большим процентом обогащения HEU) и 20% (подкритическая сборка с малым процентом обогащения LEU). Сборка с таким ядерным материалом окружена замедлителем-отражателем из бериллия. Результаты расчета такой подкритической системы приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Параметры подкритической сборки с HEU

Параметры	HEU						UO ₂
	1,0	2,0	4,0	5,0	7,0	9,0	
Плотность U , г/см ³	1,0	2,0	4,0	5,0	7,0	9,0	
K_{eff}	0,9759	0,9799	0,9756	0,9771	0,9766	0,9763	0,9741
Полный поток нейтронов, $n/\text{см}^2$	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$5,76 \cdot 10^{-4}$	$3,46 \cdot 10^{-4}$	$6,41 \cdot 10^{-4}$	$3,97 \cdot 10^{-4}$	$5,06 \cdot 10^{-4}$
Относительный диаметр, H/D	1	1	1	1	0,815	0,815	0,778

Таблица 2. Параметры подкритической сборки с LEU

Параметры	LEU			UO ₂
	2,0	3,0	7,0	
Плотность U , г/см ³	2,0	3,0	7,0	
K_{eff}	0,9769	0,9753	0,9741	0,9779
Полный поток нейтронов, $n/\text{см}^2$	$8,78 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$3,67 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$
Относительный диаметр, H/D	1,286	1,186	1,56	1

Полный поток нейтронов, показанный в таблицах 1 и 2, отнесен к одному нейтрону первоначального источника.

Также была рассмотрена гетерогенная подкритическая сборка, основу которой составляют топливные элементы типа WWR-2M. Эти топливные элементы входят в подкритическую ядерную сборку, предложенную американскими специалистами для источника нейтронов в ХФТИ, управляемую ускорителем электронов [7]. Данный топливный элемент был создан в Советском Союзе в конце 50-х годов, прошёл многолетние испытания и модернизацию и поставляется за границу. Он используется в реакторах в Венгрии, Вьетнаме, Украине и России в Институте ядерной физики в Санкт-Петербурге.

Поперечный разрез топливных элементов типа WWR показан на рис. 7. Сравнительные характеристики базового топливного элемента WWR-M2 LEU с элементами WWR-M2 и WWR-M5 приведены в табл. 3.

Таблица 3. Сравнительные характеристики топливныхборок

№	Параметр	WWR-M2 (серийная)	WWR-M2 LEU	WWR-M5 HEU (серийная)
1	Обогащение	36%	19,75%	90%
2	Масса ^{235}U в топливном элементе, г	32,4	41,7	66
3	Толщина топливного элемента, мм	2,5	2,5	1,25
4	Плотность урана в элементе	1,4	2,5	1,21
5	Толщина оболочки, мм	0,9	0,72	0,43
6	Топливо	U-Al	UO ₂ +Al	UO ₂ +Al
7	Концентрация ^{235}U , г/л	61	79	125

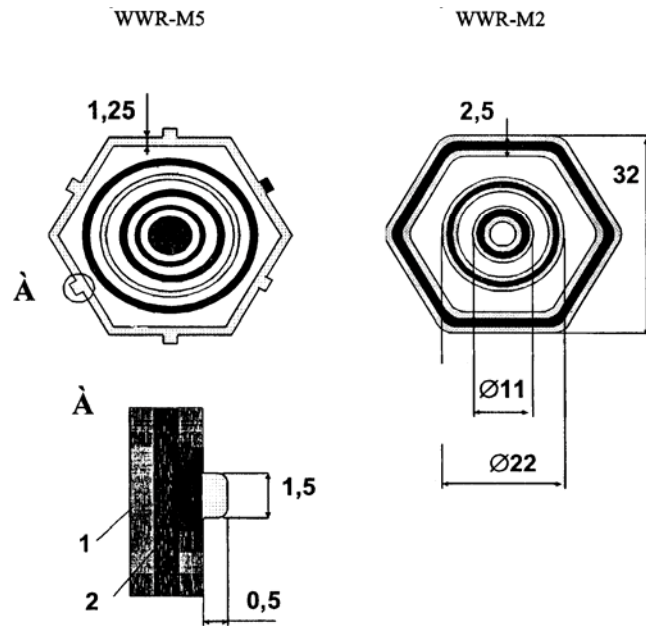


Рис. 7. Поперечные разрезы топливных сборок WWR-M:
1 – оболочка; 2 – ядерное топливо

На рис. 8 показан один из поперечных разрезов сборки с 24 топливными элементами WWR-M2, замедлителем – водой и отражателем – графитом. Результаты расчетов коэффициента размножения нейтронов в таких сборках с 24, 27 и 30 топливными элементами представлены в таблице 4. Они совпадают с данными, которые были представлены на заседании американо-украинской группы в НИЦ ХФТИ в конце 2004 года. Так, для сборки с 24 элементами K_{eff} , по данным американских физиков, равняется 0,9612 (по нашим – $K_{eff} = 0,97636$), с 27 элементами $K_{eff} = 0,9913$ по данным американской группы и $K_{eff} = 0,99476$ по данным, полученным нашей группой.

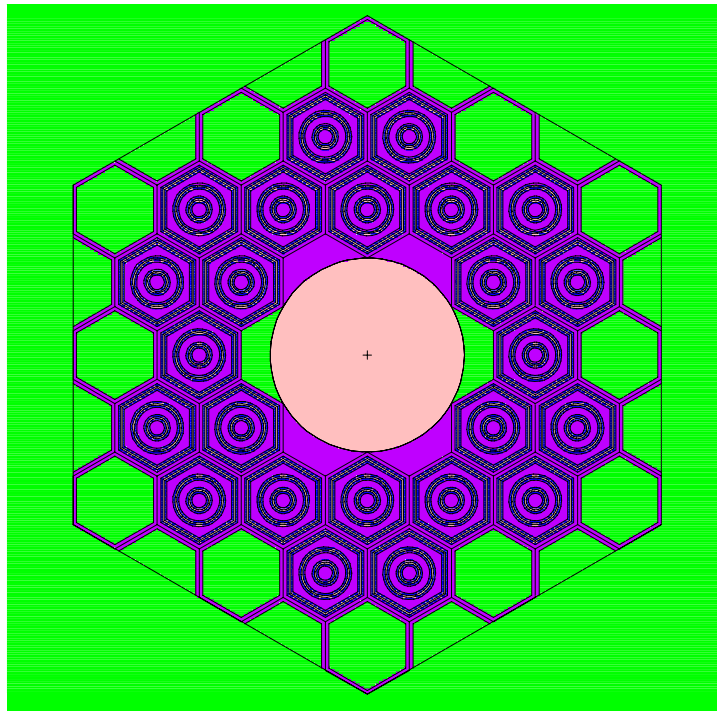


Рис. 8. Подкритическая сборка с 24 топливными элементами WWR-M2 (поперечный разрез)

Таблица 4. Параметры сборки с топливными элементами WWR-2M

Число топливных элементов	24	27	27	30	30
K_{eff}	0,97636	0,99476	0,97664	1,00796	0,97129
H/D	1,30	1,30	1,36	1,30	1,43

КОНЦЕПЦИЯ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ, УПРАВЛЯЕМОЙ ЛИНЕЙНЫМ УСКОРИТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОНОВ, НА ОСНОВЕ ТОПЛИВА РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР-1000

С использованием комплекса программ SCALE 5 было проведено моделирование и выбор параметров подкритической сборки на основе модифицированных топливных элементов реактора типа ВВЭР-1000.

На рис.9 представлена принципиальная схема подкритической сборки, состоящей из центрального канала с мишенью-конвертером, набора топливных стержней, системы водяного охлаждения, замедлителя нейтронов и графитового отражателя. Пучок электронов падает сверху на мишень-конвертер, преобразуется в пучок гамма-квантов, они создают поток фотонейтронов, который усиливается в подкритической сборке. На рис. 10 изображено поперечное сечение активной зоны. Параметры сборки приведены в таблице 5. Конвертер располагается в центральном канале диаметром 6,46 см и имеет длину 30 см. Были рассмотрены несколько вариантов мишени-конвертера из вольфрама, урана и свинца (+ 35% H₂O). Расчеты критичности сборки с этими вариантами мишени-конвертера показали, что коэффициент размножения нейтронов в сборке слабо зависит от выбора материала мишени-конвертера: K_{eff} = 0,97 для W; 0,99 для U и 0,99 для Pb.

Рассмотренный вариант конструкции содержит небольшое количество топлива – 9,7 кг.

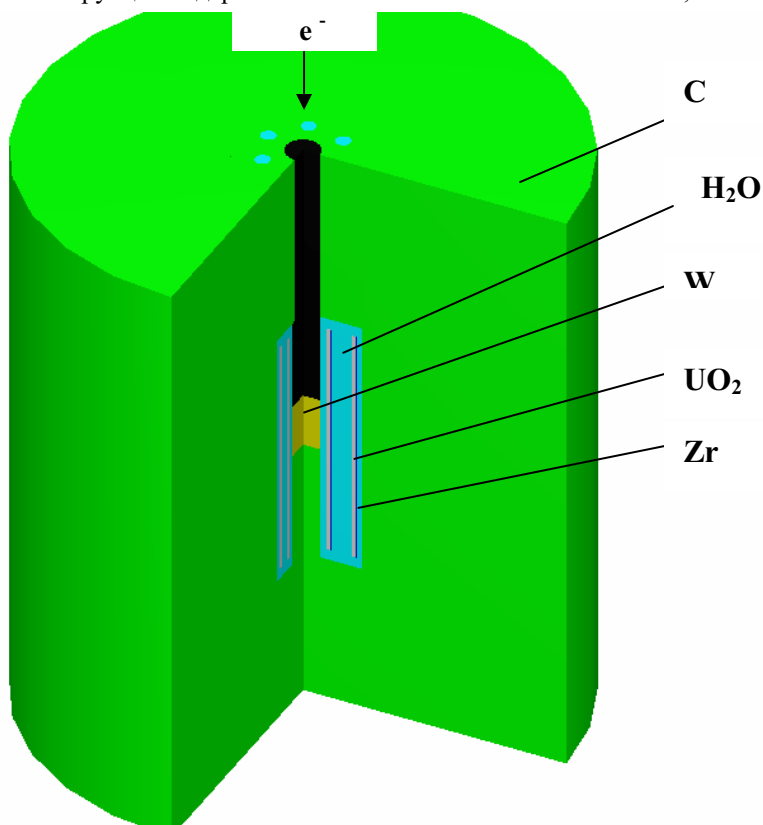


Рис.9. Принципиальная схема подкритической сборки

Было исследовано влияние уровня обогащения топлива на коэффициент размножения нейтронов в сборке. Результаты расчетов, представленные на рис. 11, показывают, что при увеличении обогащения топлива до 10% наблюдается быстрый рост K_{eff} , а затем рост существенно замедляется. Уменьшение обогащения с 80 до 20% по влиянию на K_{eff} эквивалентно уменьшению объемной доли высокообогащенного топлива в 4,5 раза.

Вывод нейтронов из активной зоны в экспериментальные каналы, как правило, производится через технологические отверстия в отражателе. Нами была исследована зависимость критичности сборки от диаметра выводящего отверстия, находящегося в боковой стенке отражателя в центральной плоскости сборки. Результаты расчетов представлены на рис. 12. Из этого рисунка видно, что отверстия диаметром до 10 см мало влияют на параметр критичности сборки.

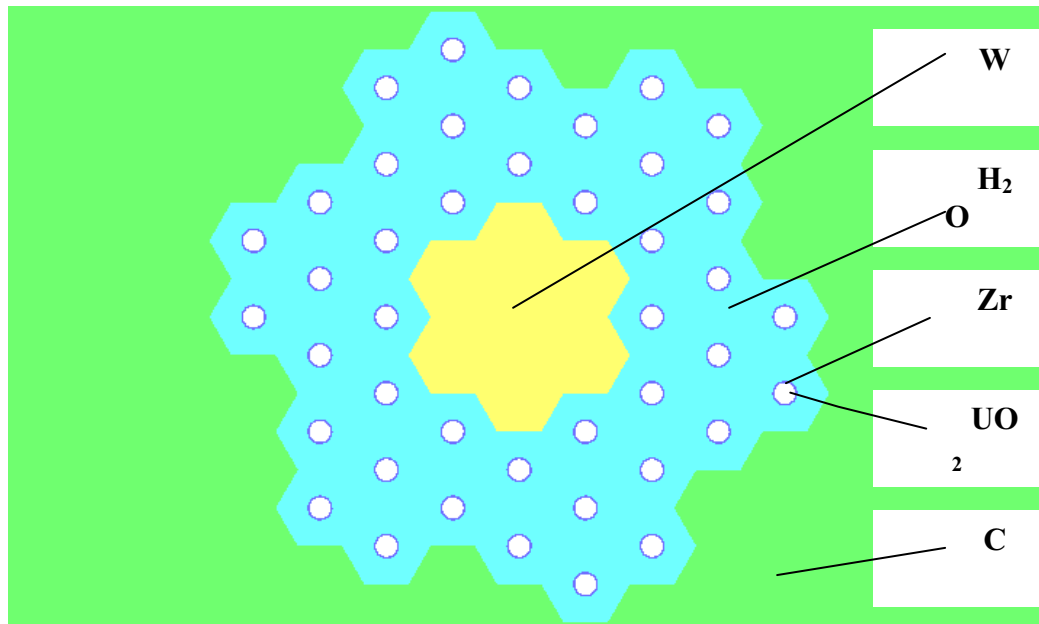


Рис.10. Поперечное сечение активной зоны

Таблица 5. Параметры сборки

Тип топлива	UO ₂
Обогащение по U-235, %	19,8
Плотность, г/см ³	10,96
Диаметр топливной таблетки, см	0,772
Толщина циркониевой оболочки, см	0,0722
Длина топливного стержня, см	45
Количество стержней	42
Шаг решетки, см	2,8

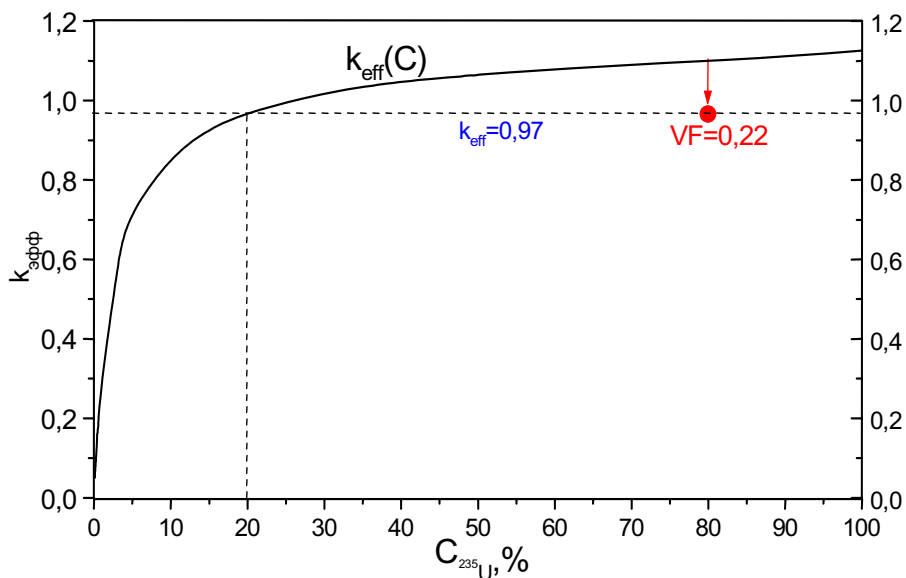


Рис. 11. Зависимость эффективного коэффициента размножения нейтронов от обогащения топлива

Был рассмотрен также более усложненный вариант подкритической сборки, отличающийся от предложенного выше наличием системы управления и защиты в активной зоне. Схема расположения топлива и направляющих каналов показана на рис. 13.

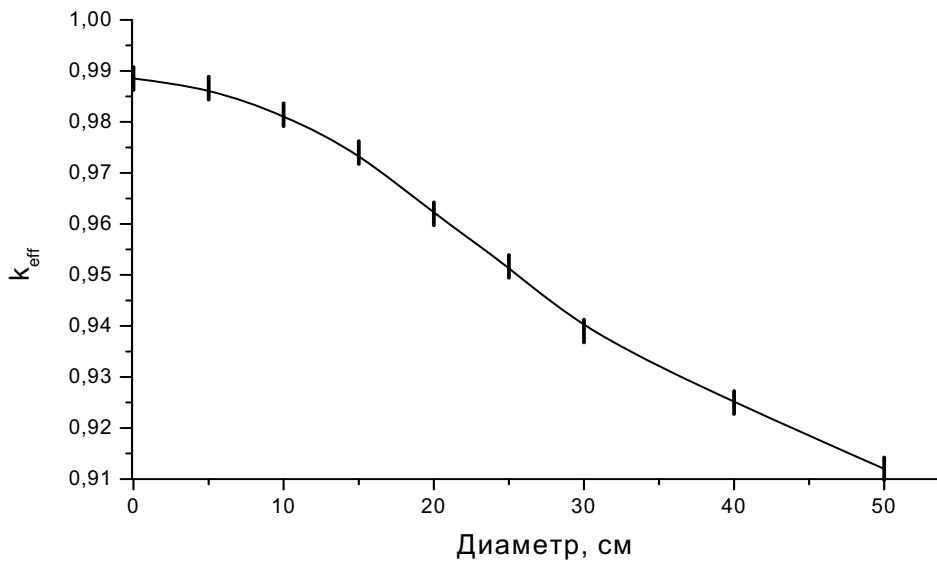


Рис. 12. Зависимость эффективного коэффициента размножения от диаметра технологического отверстия в боковой стенке отражателя

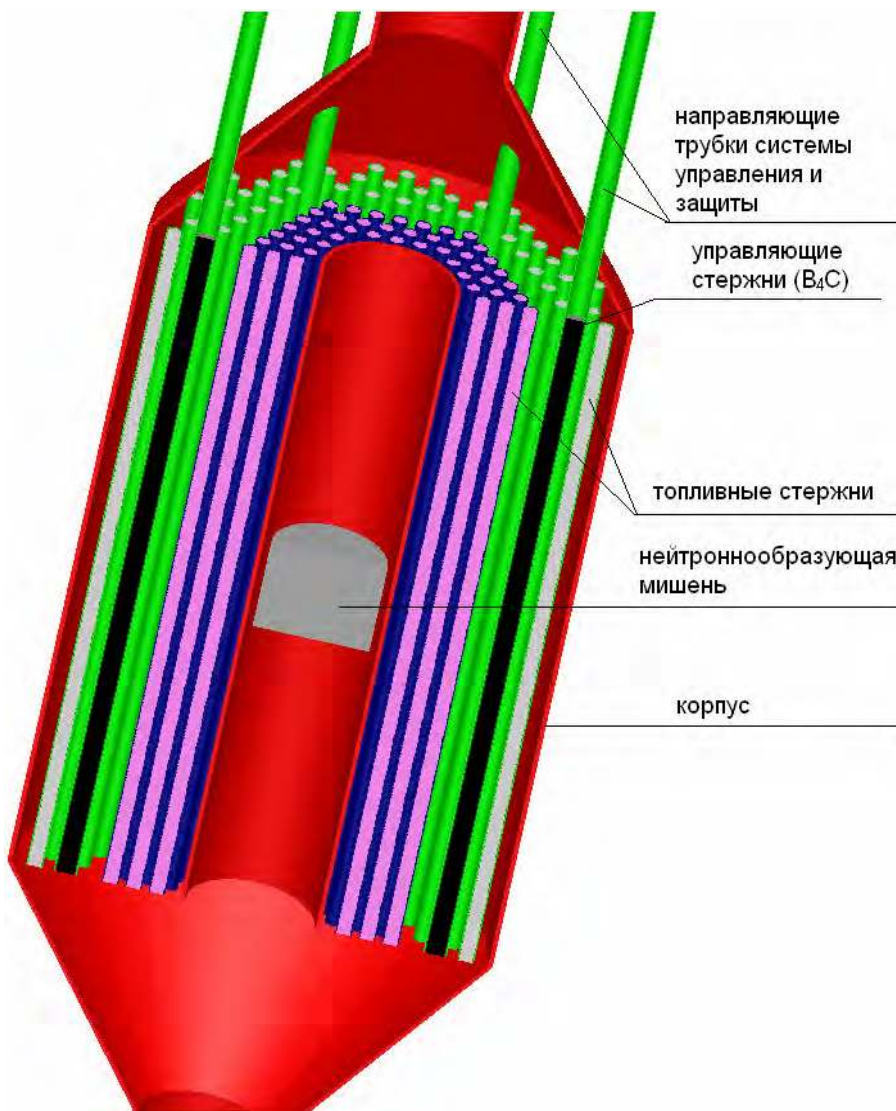


Рис. 13. Схема подкритической сборки.

Параметры топлива приведены в таблице 6. Из 180 твэлов с общим весом топлива 16 кг (3,2 кг ^{235}U) набирается подкритическая сборка радиусом 10,2 см и длиной 30 см с расстоянием между центрами твэлов 1,32 см для периферической решетки и 1 см для внутренней решетки. В подкритической сборке предусмотрены 6 направляющих каналов для ввода поглощающих стержней (ПС) управления и защиты диаметром 0,4 см и длиной 30 см. В качестве поглощающего материала для ПС был выбран карбид бора (B_4C) с плотностью 2,52 г/см³. В качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя в подкритической сборке используется вода. Для уменьшения утечки нейтронов из системы и, как следствие, уменьшения ее геометрических размеров и массы топлива, использовался графитовый отражатель. Подкритическая сборка помещается в цилиндр из нержавеющей стали марки SS304 с толщиной стенки 2 мм. Цилиндр с подкритической сборкой окружен графитовым отражателем (толщина отражателя в радиальном и аксиальном направлении варьировалась). В центре подкритической сборки

Таблица 6. Параметры топлива

Параметр	Значение
Оболочка	
Внешний диаметр, см	0,7
Внутренний диаметр, см	0,6
Длина, см	30
Плотность, г/см ³	6,56
Материал	Сплав Zr
Топливо	
Тип топлива	UO ₂
Обогащение, %	20 %
Плотность, г/см ³	10,5
Диаметр, см	0,6
Длина, см	30
Поглощающие стержни	
Материал	B ₄ C
Диаметр поглощающего стержня, см	0,8
Плотность, г/см ³	2,52

находится мишень из естественного урана радиусом 2,5 см и длиной 4 см. Мишень отделена от подкритической сборки цилиндрической трубкой из нержавеющей стали внутренним радиусом 2,8 см и толщиной стенки 2 мм. На верхней крышке стального корпуса имеются 6 циркониевых трубок, которые соосны с направляющими каналами внутри подкритической сборки, для ввода-вывода ПС управления и защиты (см. рис.14).

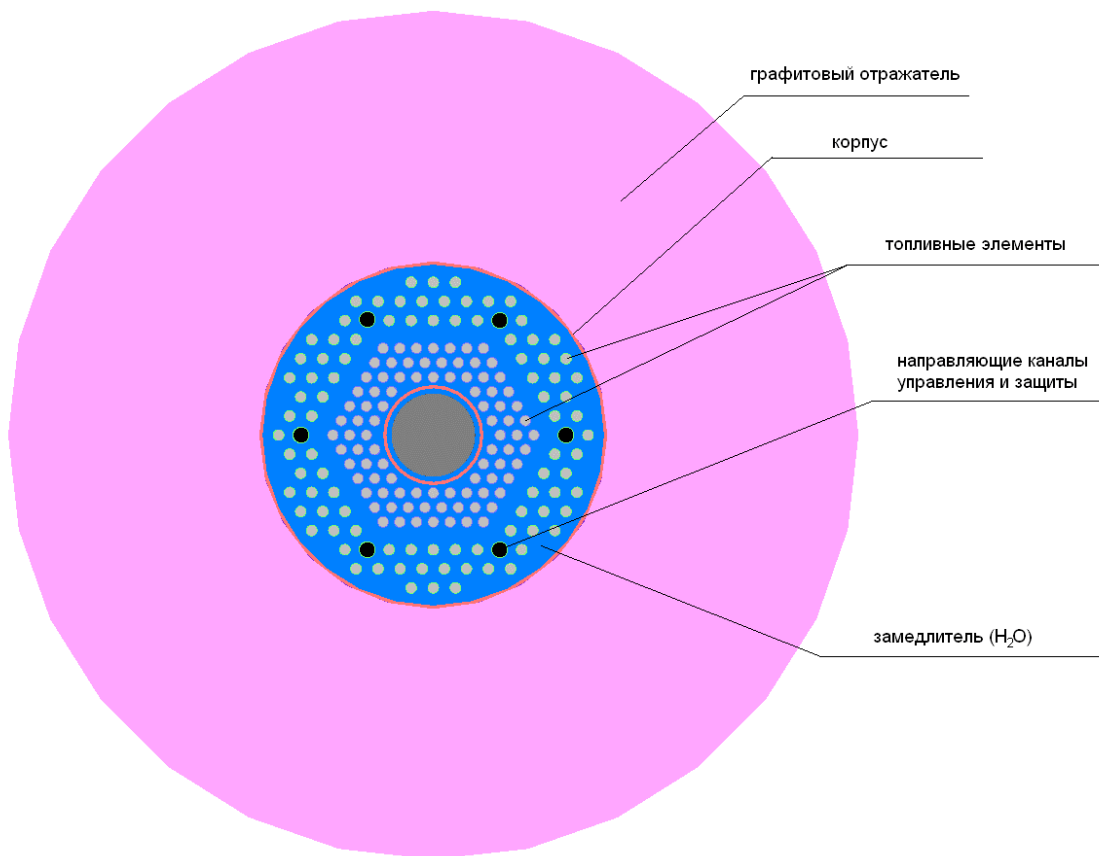
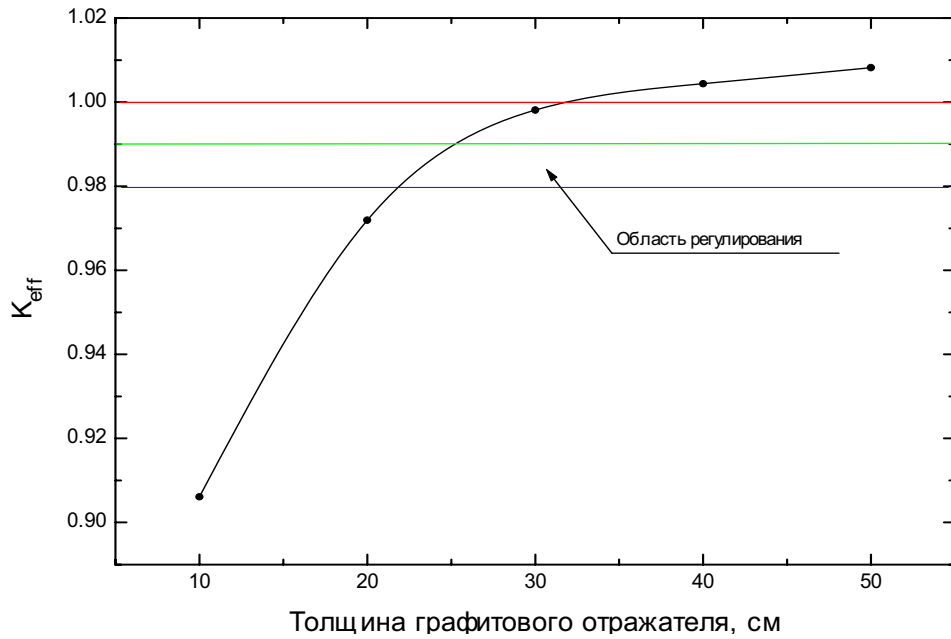
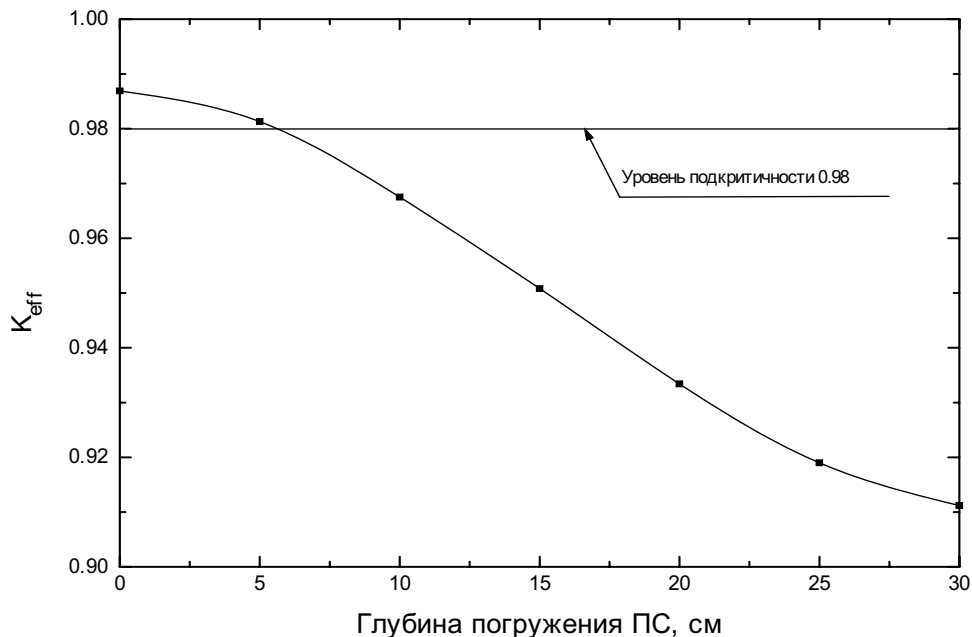


Рис. 14. Расположение топлива и направляющих каналов в подкритической сборке (вид сверху)

Для такой компоновки подкритической сборки были выполнены расчеты $K_{эфф}$ по программе SCALE 5 с вакуумными граничными условиями. На первом этапе расчетов варьировалась толщина графитового отражателя в радиальном и аксиальном направлениях. Цель этих расчетов была выбрать оптимальную толщину отражателя, чтобы при полностью выведенных стержнях управления сборка оставалась подкритической на уровне 0,99. Поскольку, рабочая подкритичность должна составлять величину 0,98, то интервал значений 0,98 ... 0,99

Рис. 15. Зависимость $K_{эфф}$ от толщины графитового отражателяРис. 16. Зависимость $K_{эфф}$ от глубины погружения ПС

можно определить как область управления подкритической сборкой. Небольшой запас по подкритичности на уровне 0,01 необходим для поддержания рабочего уровня подкритичности на уровне 0,98 по мере выгорания топлива и накопления шлаков, что, как известно, снижает реактивность системы. На рис. 15 представлены результаты расчетов $K_{эфф}$ от толщины графитового отражателя. В результате подгонки расчетных точек кубическим сплайном было определено, что толщина графитового отражателя в радиальном и аксиальном направлениях должна соответствовать 25,4 см, чтобы обеспечить уровень подкритичности 0,99.

Для этой толщины графитового отражателя был выполнен расчет $K_{эфф}$ с полностью выведенными и полностью погруженными ПС. Результаты расчета приведены ниже:

- полное погружение ПС: $K_{эфф} = 0,911 \pm 0,002$,
- полное выведение ПС: $K_{эфф} = 0,987 \pm 0,002$.

Таким образом, система регулирования подкритической сборкой в данной компоновке позволяет регулировать $K_{эфф}$ в интервале от 0,911 до 0,987 при этом сборка остается все время подкритической, обеспечивая тем самым безопасность всей установки в целом. Как уже отмечалось выше, избыточная реактивность необходима

для того, чтобы по мере выгорания топлива в твэлах обеспечить с помощью регулирования рабочую величину подкритичности на уровне 0,98.

Для определения регулируемости подкритической сборки и определения рабочего положения ПС, обеспечивающего $K_{эфф}=0,98$, был выполнен расчет $K_{эфф}$ с вводом в подкритическую сборку ПС с шагом 5 см. Результаты расчета представлены на рисунке 16. Из графика видно, что рабочая подкритичность на уровне 0,98 обеспечивается погружением ПС на глубину 5,5 см.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе данные свидетельствуют о возможности создания в НИЦ ХФТИ модели энергетического реактора, на основе подкритической сборки из низкообогащенного урана, управляемой электронным ускорителем "SALO" со сверхпроводящей ускоряющей структурой.

Имеющиеся комплексы программ MCNP и SCALE 5 позволяют производить анализ вариантов конструкции подкритической сборки и получать результаты, сопоставимые с результатами, получаемыми в других исследовательских центрах. Результаты моделирования свидетельствуют, что использование топлива с обогащением свыше 20% не дает существенного увеличения эффективного коэффициента размножения нейтронов и существует возможность создания подкритической сборки на 20 % обогащенном диоксиде урана с регулируемым коэффициентом размножения нейтронов $K_{эфф}$.

Установка может быть также использована как мощный источник нейтронов для работ в области фундаментальной физики, прикладных исследований по физике твёрдого тела, радиационного материаловедения, получения медицинских изотопов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carminati F., Klapisch R., Revol J.P., Roche Ch., Rubio J.A., Rubbia C. An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator. Geneva.: 1993. 72c. (CERN/AT/93-47 (ET)).
2. Roche C. and Rubbia C. Some preliminary Considerations on the Economical Issue of the Energy Amplifier, CERN/AT/95-45 (ET).
3. Rubbia C., Rubio J.A., Buono S. et al. Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier. CERN/AT/95-44 (ET).
4. Аксёнов В.Л. Нейтронная физика на пороге 21 века. - ЭЧАЯ. - 2000. - Т. 31. - В.6.- С.1303-1342.
5. Лазарев Н.В., Козодаев А.М. Сверхмощные линейные ускорители протонов для нейтронных генераторов и электроядерных установок // Атомная энергия.- 2000. - Т.89. - №6. - С.440-454.
6. Ridikas D., Safa H., Giacri M.-L. Conceptual Study Of Neutron Irradiator Driven By Electron Accelerator //7th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product P&T (NEA/OCDE), Jeju, Korea, 14-16 Oct. 2002.
7. Proceedings of the Ukraine-USA meeting "Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility", Матеріали українсько-американського семінару "Установка з підкритичною збіркою, керована прискорювачем часток" UKRAINE-USA Meeting "Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility", УКРАЇНА, Харків, 24-25 лютого 2005 Під редакцією професора, доктора фізико-математичних наук Довбні А. М. НИЦ ХФТИ, Харків, 2005.
8. Аркатов Ю.М., Гламаздин А.В., Гук И.С., Довбня А.Н., Кононенко С.Г., van der Wiel M., Botman J.I.M., Пеев Ф.А., Тарасенко А.С. Базовая ускорительная установка НИЦ ХФТИ по ядерной физике и физике высоких энергий, THE "SALO" PROJECT. Харьков, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2004.
9. Teichert J., Buettig H., Evtushenko P., Janssen D., Lehnert U., Michel P., Moeller K., Schneider Ch., Stephan J., Lehmann W.-D., Will I., Volkov V.: Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 2004, c. 333-335.

RECIRCULATOR "SALO" - A BASIS FOR CREATION OF A MODEL OF SUB-CRITICAL REACTOR CONTROLLED BY THE ACCELERATOR

V.V. Gann*, I.S. Guk*, A.N. Dovbnya*, S.G. Kononenko*, A.S. Kostromin*, F.A. Peev*, I.M. Prochorets*, C.A. Soldatov*, A.S. Tarasenko*, M. van der Wiel**, J.I.M. Botman**

*NSC KIPT, Kharkov, Ukraine

**TUE, Eindhoven, The Netherlands

Recently opportunities of creation test facility with sub-critical reactors controlled by accelerators of particles are actively discussed. At an initial stage of these researches it is the most expedient to use electron accelerators as cost of such facility will be much less, than at use of proton beams. Thus it will be possible to study all physical processes occurring at teamwork of the accelerator and sub-critical assembly. In work the special operating mode recirculator "SALO" is considered in structure of model of the future power plants. The channel of beam transportation to a target and requirements to stability of beam parameters on the targets is described. Some variants of a design sub-critical assembly on basis a low enrichment uranium are resulted.

KEY WORDS: recirculator, sub-critical assembly, electron accelerator.