

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УРАН-ГИДРИДЦИРКОНИЕВЫХ КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК С 21%, 36% И 45% ОБОГАЩЕНИЕМ ПО УРАНУ-235

Сикорин С. Н., Мандик С.Г., Полозов С.А., Григорович Т.К.
(Научное учреждение «ОИЭЯИ – Сосны», Минск, Беларусь)

Введение

В государственном научном учреждении «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси было создано несколько критических стендов для исследования в обоснование разработки малогабаритных реакторов различного назначения, в том числе реактора передвижной АЭС «Памир-630Д» [1], с гидридциркониевым замедлителем и различными материалами ядерного топлива, поглотителя и отражателя.

Эксперименты проводились на критических стендах «Эдельвейс», ГФС, «Кристалл» и «Гиацинт». Результаты ряда экспериментов кроме разработки новых реакторов использовались также для верификации математических кодов и библиотек ядерных данных, используемых для расчета нейтронно-физических характеристик уран-гидридциркониевых размножающих систем. В экспериментах использовалось ядерное топливо на основе UO_2 с обогащением 21%, 36% и 45% по урану-235. Было исследовано более 50 критических сборок с гидридциркониевым замедлителем.

В настоящее время различные ядерные центры мира используют результаты экспериментов на критических сборках по критическим параметрам и другим нейтронно-физическим характеристикам для верификации математических кодов и библиотек ядерных данных. Результатом этих усилий стали международные справочники данных [2, 3].

Анализ данных, содержащихся в этих справочниках, показал, что они не являются полными. В частности, они фактически не включают данные по критичности и другим характеристикам уран-гидридциркониевых размножающих систем со средним обогащением.

В данной работе представлены экспериментальные данные для двенадцати уран-гидридциркониевых конфигураций, исследованных на критических стендах «Кристалл» и «Гиацинт». Описание указанных критических стендов приведено в работах [4-6].

1. Конфигурации критических сборок

Конструктивной основой исследованных на критическом стенде «Кристалл» критических сборок конфигураций 1-8 является цилиндрический корпус (корзина) из нержавеющей стали, в которой размещались топливные кассеты, чехловые трубы (каналы) стержней управления и кассеты бокового отражателя. Корпус имеет внешний диаметр 692 мм и высоту 720 мм. Внутренняя поверхность корпуса имеет конфигурацию периферии бокового отражателя. Эффективная толщина боковой стенки корпуса составляет 45 мм. Днищем корпуса является дистанционирующая решетка (трубная доска) толщиной 40 мм. В дистанционирующей решетке имеется 151 втулка с отверстием диаметром 17 мм для установки топливных кассет и кассет отражателя по гексагональной решетке с шагом 45 мм, а также 12 отверстий диаметром 50 мм для установки чехловых труб стержней управления. Корпус критической сборки своим внешним буртом опирается на опорный фланец, представляющий собой кольцо из нержавеющей стали высотой 50 мм, наружным и внутренним диаметрами 814 мм и 693 мм соответственно. Опорный фланец крепится к четырем опорным швеллерам из

стали, прикрепленным к плитам из стали толщиной 25 мм опорной конструкции критической сборки.



Рис. 1. Критические сборки конфигураций 1–4 на критическом стенде «Кристалл»

Между дном корпуса критической сборки и стальными плитами опорной конструкции располагаются четыре кольца из нержавеющей стали общей высотой 140 мм, имеющие наружный и внутренний диаметры соответственно 780 мм и 700 мм и три плиты из нержавеющей стали общей толщиной 105 мм и диаметром 880 мм. В плитах имеется 12 отверстий диаметром 47 мм, через которые проходят чехловые трубы стержней управления. Нижняя плита опирается на стальную опорную плиту опорной конструкции критической сборки.

Для критических сборок конфигураций 1–4 (рис. 1) корпус (корзина) окружен стальным боковым отражателем, состоящим из двух частей: нижней и верхней.

Нижняя часть стального отражателя с внутренним диаметром, равным внешнему диаметру корзины 692 мм, внешним диаметром 966 мм и высотой 733 мм, установленная на уровне активной зоны, состояла из 13 цилиндров, вставленных один в другой и соединенных болтами. Пять внутренних цилиндров изготовлены из нержавеющей стали толщиной 8 мм. Толщина пяти цилиндров составляла 46 мм. Остальные восемь наружных цилиндров были изготовлены из стали толщиной 10 мм. Толщина восьми цилиндров составляла 91 мм. Общая толщина нижней части отражателя 137 мм, пористость 14%. Нижняя часть стального отражателя размещалась на кольцах, установленных на плитах нижней конструкции критической сборки.

Верхняя часть отражателя с внутренним диаметром 710 мм и внешним диаметром 930 мм состояла из 10 цилиндров из стали толщиной 10 мм, вставленных один в другой. Высота верхней части отражателя составляла 285 мм. Толщина верхней части отражателя 110 мм, пористость 10%. Нижнее основание верхней части отражателя размещалось на опорном кольце корпуса (корзины).

Вокруг корпуса (корзины) критических сборок конфигураций 5-8 установлены 48 цилиндров из стали диаметром 44 мм и высотой 1100 мм.

Верхний торцевой отражатель критических сборок конфигураций 1–4 представлял собой шестигранные блоки (151 шт.) из нержавеющей стали с размером под ключ 44 мм и высотой 125 мм, которые устанавливались на верхние торцевые части топливных кассет, кассеты гидридциркониевого отражателя и блоки отражателя из нержавеющей стали.

На критическом стенде «Гиацинт» исследовались критические сборки конфигураций 9–12 (рис. 2 и 3). Топливные кассеты, кассеты гидридциркониевого отражателя, блоки стального отражателя и бериллиевые сегменты отражателя размещались на опорной решетке из нержавеющей стали.



Рис. 2. Критические сборки конфигураций 9 и 10 на критическом стенде «Гиацинт»



Рис. 3. Критические сборки конфигураций 11 и 12 на критическом стенде «Гиацинт»

Опорная решетка критических сборок размещалась на раме и представляла собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 950 мм и толщиной 65 мм. Опорная решетка имела отверстия диаметром 17,2 мм в гексагональной решетке с шагом 45 мм. В этих отверстиях размещались хвостовики топливных кассет, кассет и блоков бокового отражателя.

Во всех критических сборках детекторы контроля нейтронного потока, размещенные внутри корпусов из оргстекла, располагались за стальным боковым отражателем критических сборок.

2. Элементы активной зоны и отражателя критических сборок

На критическом стенде «Кристалл» были исследованы критические сборки конфигураций 1–4: неоднородные гетерогенные многозонные гексагональные решетки, содержащие топливные кассеты (шаг 45 мм) с замедлителем из гидрида циркония, чехловые трубы (каналы) для поглощающих стержней, кассеты отражателя из гидрида циркония и блоки отражателя из нержавеющей стали. Эти элементы критических сборок размещались в описанном выше цилиндрическом корпусе (корзине) с дистанционирующей решеткой.

В экспериментах на критических сборках конфигураций 1–4 использовались три типа топливных кассет (рис. 4). Оболочки всех топливных кассет и кассет гидридциркониевого отражателя представляли собой тонкостенную шестигранную трубку из нержавеющей стали с размером под ключ 44 мм и толщиной стенки 0,4 мм.

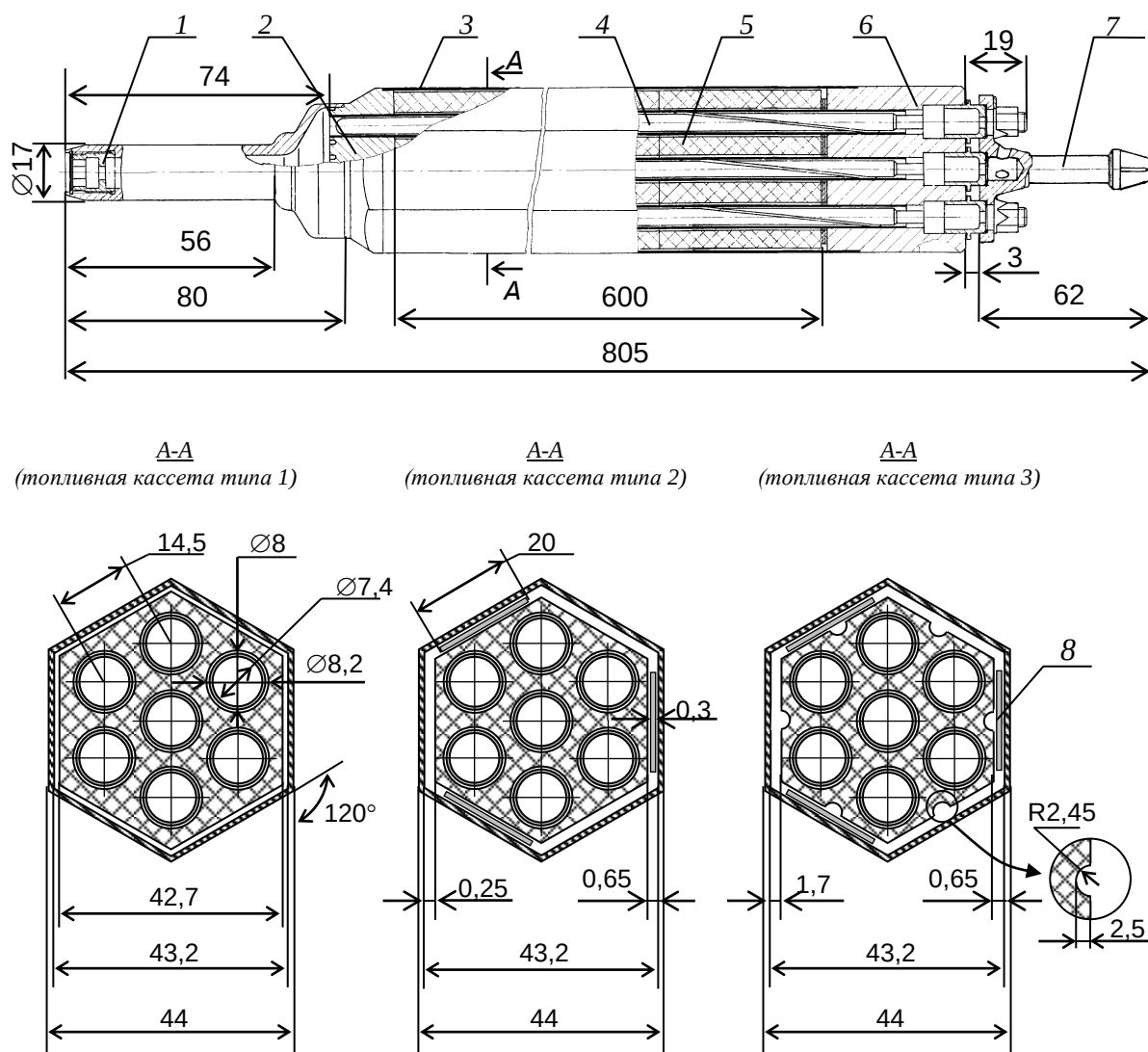


Рис 4. Топливные кассеты типа 1-3:

1 – хвостовик; 2 – нижняя трубная доска; 3 – обсадная труба; 4 – твэл; 5 – блоки гидрида циркония; 6 – верхняя трубная доска; 7 – головка; 8 – лента с выгорающим поглотителем

В топливной кассете типа 1 и в кассете гидридциркониевого отражателя внутри шестигранной трубы установлены 12 шестигранных блоков замедлителя из гидрида циркония $ZrH_{1,9}$ плотностью $5,6 \text{ г/см}^3$ высотой 50 мм и размером под ключ 42,7 мм каждый. В блоках замедлителя с шагом 14,5 мм выполнены семь отверстий диаметром 8,3 мм, в которых размещены канальные трубы из нержавеющей стали наружным диаметром 8 мм с толщиной стенки 0,3 мм. Количество твэлов типа 1 (рис. 5) в топливных кассетах всех типов 1–3 – семь. Головки твэлов фиксируются в отверстиях верхней части кассеты прижимом шпильками. В топливных кассетах типа 2 и типа 3 в отличие от топливной кассеты типа 1 в центральной части на высоте 300 мм в зазорах между шестигранной трубой и блоками гидрида циркония через грань размещены три ленты с борным поглотителем. Материал ленты – нержавеющая сталь, легированная

бором с обогащением по изотопу ^{10}B – 85%. Лента имеет ширину 20 мм и толщину 0,3 мм. Топливная кассета типа 3 отличается от топливной кассеты типа 2 тем, что в блоках гидрида циркония, размещенных в центральной части этой кассеты на высоте 300 мм, выполнены выборки, обеспечивающие содержание замедлителя в этой части кассеты, эквивалентное гидриду циркония состава $\text{ZrH}_{1,5}$. В кассете гидридциркониевого отражателя твэлы заменены на стальные трубки диаметром 6,2 мм и толщиной стенки 0,4 мм.

Блоки отражателя из нержавеющей стали полностью соответствуют габаритам топливных кассет типа 1-3. На трех боковых гранях (через одну) блоков отражателя из нержавеющей стали имеются выборки глубиной 12 мм и высотой 425 мм.

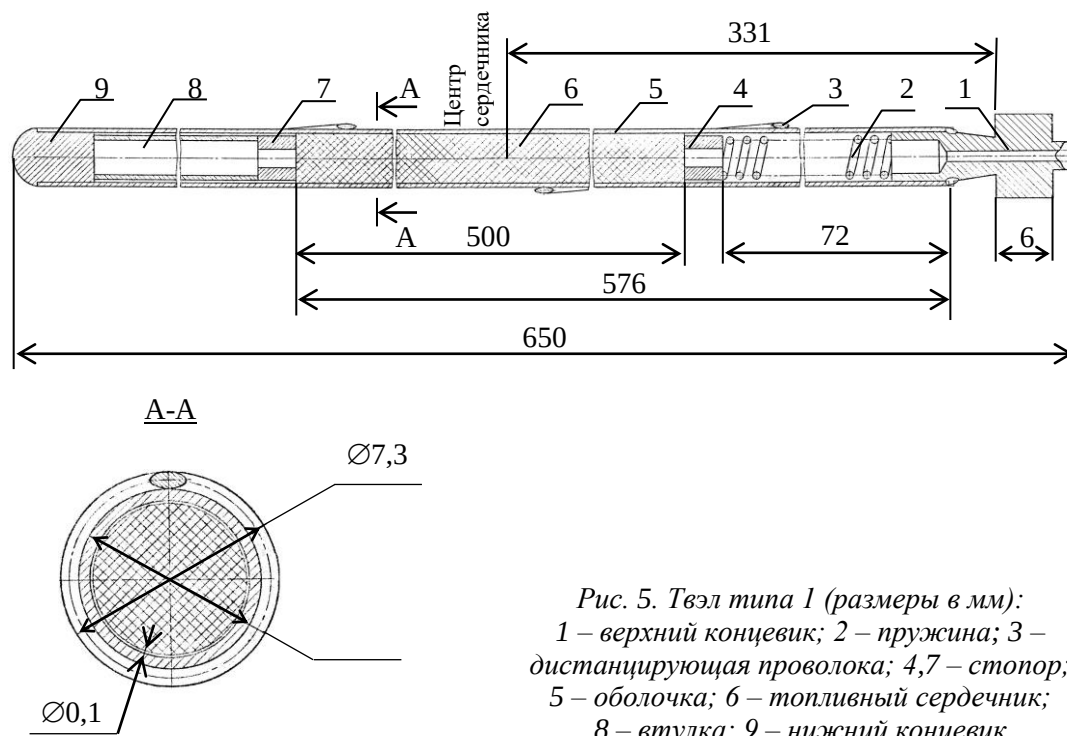


Рис. 5. Твэл типа 1 (размеры в мм):
1 – верхний концевик; 2 – пружина; 3 –
дистанцирующая проволока; 4, 7 – стопор;
5 – оболочка; 6 – топливный сердечник;
8 – втулка; 9 – нижний концевик

Оболочка твэла типа 1 выполнена из трубы из нержавеющей стали наружным диаметром 6,2 мм и толщиной стенки 0,4 мм. Топливный сердечник изготовлен из таблеток (стержней) диаметром 5,2 мм и высотой 50 мм. Топливная композиция представляет собой сферические частицы UO_2 диаметром 0,4-0,6 мм с обогащением 45% по урану-235, покрытые никелем и хромом ($\text{UO}_2\text{-Ni-Cr}$). Объемное содержание диоксида урана UO_2 в топливной композиции составляет 59%. Таблетки (стержни) состоят из прессованных сферических частиц $\text{UO}_2\text{-Ni-Cr}$, покрытых оболочкой из нержавеющей стали толщиной 0,06 мм. Массовая доля компонентов в топливных таблетках (стержнях): U – 55%; Ni+Cr – 34%; Cr/Ni – 40%; Fe – $\leq 4\%$. Общая высота топливного сердечника 500 мм. Средняя масса урана-235 в твэле 24,8 г. Твэл заполнен гелием под давлением 10 атм. Общая длина твэла 650 мм. На оболочку твэла с шагом 100 мм навита проволока из нержавеющей стали диаметром 0,55 мм и приварена к концам твэла.

Критические сборки конфигураций 1-4 содержали 12 каналов для стержней регулирования; шесть из них располагались на радиусе 119 мм (внутренняя зона) и шесть – на радиусе 206 мм (внешняя зона). Канал для стержня регулирования представлял собой трубу из нержавеющей стали диаметром 42 мм, толщиной стенки 3 мм и длиной 1350 мм. В каналах размещались стержни регулирования типа 1 (рис. 6).

Стержень регулирования типа 1 включал в себя поглощающее и рассеивающее звенья. Верхнее поглощающее звено представляет собой две концентрические трубы из нержавеющей стали диаметром 33 мм, толщиной стенки 1,0 мм и диаметром 17 мм, толщиной стенки 0,5 мм соответственно. Зазор между этими трубами заполнен Eu_2O_3 с плотностью $5,3 \text{ г/см}^3$ на длину 400 мм. Внутренняя труба диаметром 17 мм и толщиной стенки 0,5 мм заполнена Al_2O_3 с плотностью $2,1 \text{ г/см}^3$. Нижнее рассеивающее звено представляло собой трубу из нержавеющей стали диаметром 33 мм и толщиной стенки 1,0 мм, заполненную порошком Al_2O_3 с плотностью $2,1 \text{ г/см}^3$. При выводе из критической сборки поглощающая часть стержня находилась вне активной зоны, а рассеивающая - в активной зоне. В выведенном из активной зоны состоянии низ поглотителя нейтронов совпадал с верхом ядерного топлива в твэле.

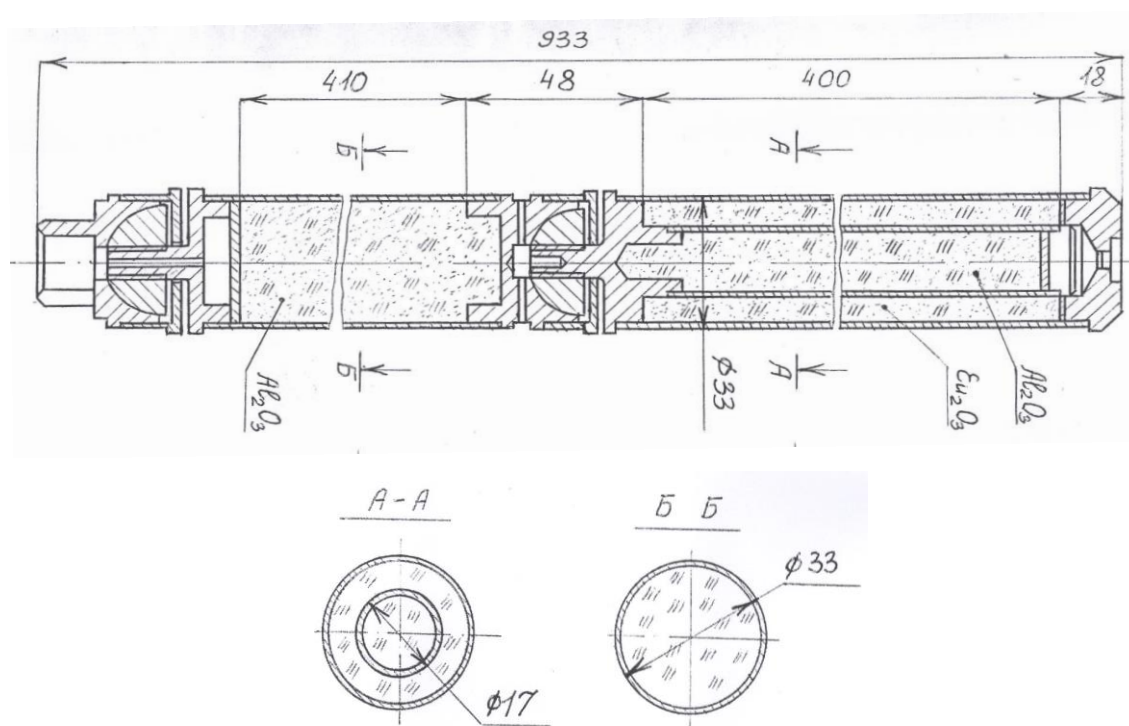


Рис. 6. Стержень регулирования типа 1 (размеры в мм)

На критическом стенде «Кристалл» также были исследованы критические сборки конфигураций 5–8: неоднородные многозонные уран-гидридциркониевые решетки, содержащие (шаг 45 мм) топливные кассеты с гидридциркониевым замедлителем, чехловые трубы (каналы) стержней управления, кассеты гидридциркониевого отражателя. Эти элементы критических сборок размещались в описанном выше цилиндрическом корпусе (корзине) с дистанционирующей решеткой.

В экспериментах использовались три типа топливных кассет типа 4–6 (рис. 7), имеющих близкие размеры и состав к топливным кассетам типа 1–3. Оболочка всех топливных кассет типа 4–6 представляет собой тонкостенную шестигранную трубу из нержавеющей стали с размером под ключ 44 мм и толщиной стенки 0,4 мм.

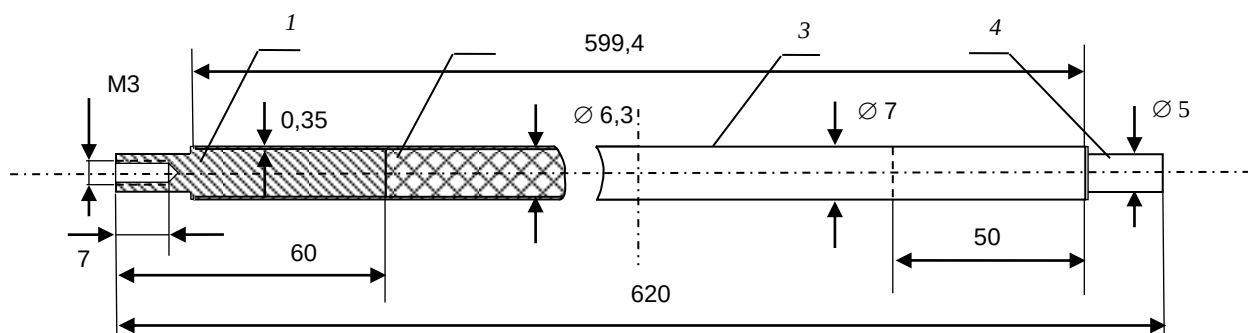
Внутри оболочки топливной кассеты типа 4 установлены 12 шестигранных блоков замедлителя из гидрида циркония $\text{ZrH}_{1,89}$ высотой 50 мм и размером под ключ 42,85 мм каждый. В блоках замедлителя с шагом по треугольной решетке 14,5 мм выполнены семь отверстий диаметром 8,2 мм, в которых размещены каналные трубы из нержавеющей стали наружным диаметром 8 мм с толщиной стенки 0,25 мм. Все

Technical drawing of a three-layered cable with a braided shield and a central conductor. The drawing shows a cross-section of the cable with various layers and dimensions. The central conductor is labeled 1, the braided shield is labeled 2, and the outer jacket is labeled 3. The dimensions are given in millimeters (mm). The total length of the cable is 708 mm. The dimensions of the individual layers are: 18 mm for the central conductor, 3 mm for the braided shield, 5 mm for the outer jacket, 5 mm for the braided shield, and 4 mm for the outer jacket. The dimensions of the cable are: 55 mm for the central conductor, 23 mm for the braided shield, 600 mm for the outer jacket, 25 mm for the braided shield, and 84 mm for the outer jacket. The drawing also shows a detail of the braided shield with a diameter of $\varnothing 9$ and a thickness of 17 mm.

1 – хвостовик; 2 – нижняя трубная доска; 3 – корпус; 4 – обсадная трубка; 5 – твэл; 6 – блоки гидрида циркония; 7 – верхняя трубная доска; 8 – головка

Корпус кассеты бокового отражателя представляет собой шестигранную трубу из нержавеющей стали длиной 640 мм с размером под ключ 44 мм и толщиной стенки 0,4 мм. Внутри шестигранной трубы на всю длину кассеты установлены шестигранные блочки из гидрида циркония $ZrH_{1,89}$ плотностью $5,0 \text{ г/см}^3$, высотой 15 мм и размером под ключ 43,0 мм каждый. Блочки имеют отверстие диаметром 28 мм, в которое на всю длину кассеты установлен стержень из оргстекла диаметром 27 мм.

Твэл типа 2 (рис. 8) представляет собой оболочку из нержавеющей стали наружным диаметром 7 мм, толщиной стенки 0,35 мм и длиной 600 мм, заполненную на высоту 500 мм UO_2 плотностью 5,25 г/см³. Верхняя и нижняя концевые детали твэла выполнены из нержавеющей стали и имеют длину 60 мм. Общая длина твэла 620 мм. Топливный сердечник твэла состоит из UO_2 с обогащением 36,3% по урану-235. Средняя масса UO_2 в твэле 81,9 г. Масса урана-235 в твэле 26,1 г.



1 – верхний концевик; 2 – топливный сердечник; 3 – оболочка; 4 – нижний концевик

Твэл типа 3 (рис. 9) состоит из топливного сердечника, оболочки, двух фиксаторов, пружины и концевых деталей – пробки верхней и нижней. Оболочка твэла выполнена из нержавеющей стали и имеет наружный диаметр 6,2 мм и толщину стенки 0,4 мм. Топливный сердечник состоит из таблеток диаметром 5,2-5,3 мм и высотой 5-7 мм, выполненных из UO_2 плотностью 10,2 г/см³. Обогащение по урану-235 составляет 21,2%. Общая высота сердечника 500 мм. Средняя масса UO_2 в твэле 109,8 г. Масса урана-235 в твэле 20,47 г. Общая длина твэла 651 мм. На оболочку твэла с шагом 100 мм навита проволока из нержавеющей стали, которая приварена по концам твэла.

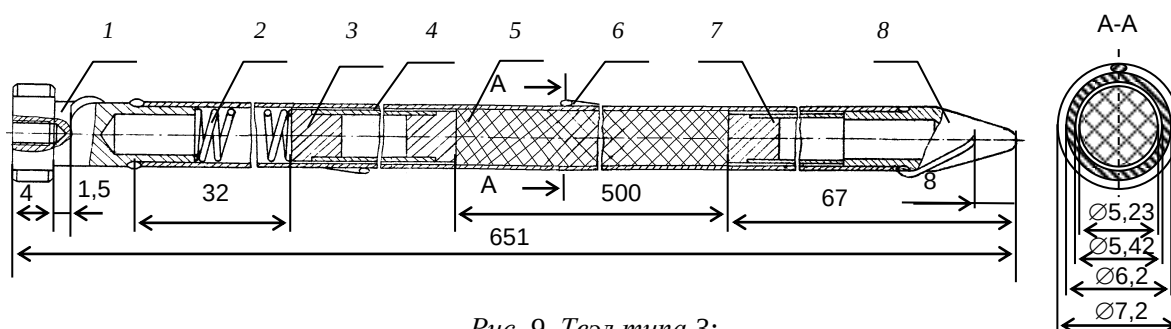


Рис. 9. Твэл типа 3:

1 – пробка верхняя; 2 – пружина; 3 – фиксатор; 4 – оболочка; 5 – топливный сердечник;
6 – дистанционирующая проволока; 7 – фиксатор; 8 – пробка нижняя

В активной зоне критических сборок конфигураций 5-8 располагались 12 каналов стержней регулирования, шесть из которых располагались на радиусе 119 мм (внутренний пояс) и шесть на радиусе 206 мм (внешний пояс). В каналах размещались 12 стержней регулирования. Поглощающая часть стержней регулирования типа 2 (№№ 7 и 8) в критических сборках конфигураций 5 и 6 представляет собой трубу из нержавеющей стали диаметром 30 мм и толщиной стенки 1 мм, заполненную B_4C плотностью 1,4 г/см³ на длину 500 мм. В качестве остальных стержней регулирования на критических сборках конфигураций 5-8 использовались стержни типа 1.

В экспериментах на критическом стенде «Гиацинт» исследовались критические сборки конфигураций 9-12: однородные и неоднородные гетерогенные гексагональные решетки (шаг 45 мм), содержащие топливные кассеты с замедлителем гидроксида циркония, кассеты с каналами для поглощающих стержней. Использовались топливные кассеты типа 1-3, каждая из которых содержала 7 твэлов типа 3.

Кассета с поглощающим стержнем (рис. 10) имеет корпус в виде шестигранной трубы из нержавеющей стали с размером под ключ 44 мм и толщиной стенки 0,4 мм. Шестигранная труба соединена с хвостовиком. Кассета содержит трубу из нержавеющей стали диаметром 42 мм и толщиной стенки 3 мм, в которой размещен поглощающий стержень. Этот стержень не может перемещаться, т.е. не является стержнем регулирования.

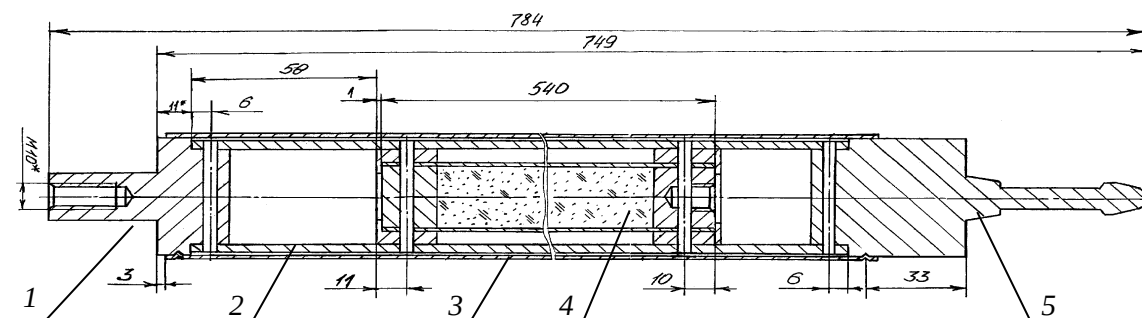


Рис. 10. Кассета с поглощающим стержнем типа 3:

1 – хвостовик; 2 – труба; 3 – шестигранная труба; 4 – поглощающий стержень;
5 – верхняя головная часть

Поглощающий стержень типа 3 (рис. 11) представляет собой оболочку из нержавеющей стали диаметром 26 мм и толщиной стенки 1 мм, заполненную карбидом бора плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$ на высоту 500 мм. Общая длина поглощающего стержня 540 мм.

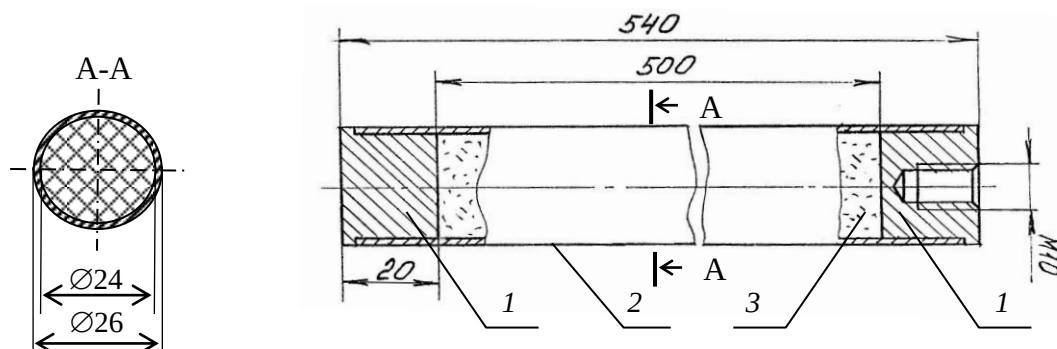


Рис. 11. Поглощающий стержень типа 3:

1 – верхняя и нижняя концевые детали; 2 – оболочка; 3 – карбид бора

Критические сборки конфигураций 9-12 содержали шесть стержней регулирования.

Все стержни регулирования критическихборок конфигураций 9 и 10 представляют собой кластер из трех составных стержневых элементов. Каждый элемент состоит из двух частей: нижней, содержащей твэл типа 3, и верхней, содержащей поглощающий стержень типа 4.

Стержни регулирования критическихборок конфигураций 11 и 12, расположенные в активной зоне, представляют собой поглощающие стержни типа 3. Эти поглощающие стержни перемещаются в специальной кассете. Стержни регулирования критическихборок конфигураций 11 и 12, размещенные в бериллиевом отражателе, также являются стержнями типа 3.

Поглощающий стержень типа 4 (рис. 12) состоит из цилиндрической оболочки из нержавеющей стали диаметром 6,2 мм и толщиной стенки 0,4 мм, заполненный B_4C плотностью $1,3 \text{ г/см}^3$ на длину 500 мм, верхней и нижней концевых деталей из нержавеющей стали диаметром 5,4 мм и длиной 84 мм и 67 мм соответственно.

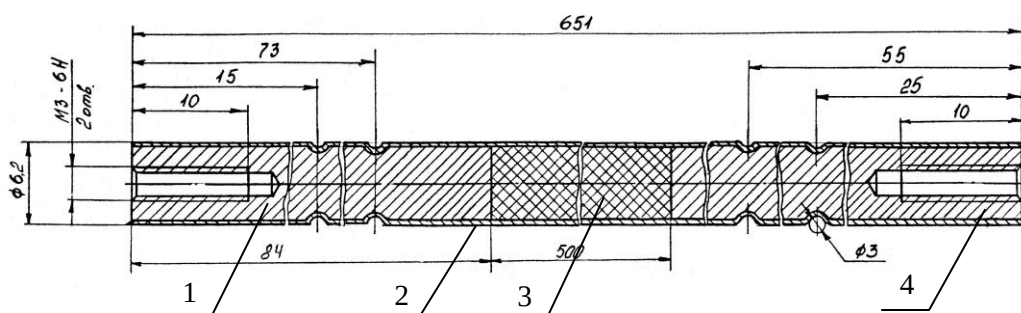


Рис. 12. Поглощающий стержень типа 4:

1 – верхняя концевая деталь; 2 – оболочка; 3 – карбид бора; 4 – нижняя концевая деталь

Кассета отражателя из гидрида циркония аналогична топливной кассете типа 1, но содержит имитаторы (трубки) из нержавеющей стали вместо твэлов. Блок стального отражателя изготовлен из нержавеющей стали и повторяет геометрические размеры кассеты отражателя из гидрида циркония. Собранные двенадцать сегментов бериллиевого отражателя представляют собой цилиндр диаметром 714 мм и высотой 600 мм, с шестигранным отверстием с размером под ключ на 438 мм.

3. Нейтронно-физические характеристики критических сборок

3.1. Критические сборки конфигураций 1–4

На рисунке 13 представлены картограммы загрузки критических сборок конфигураций 1–4.

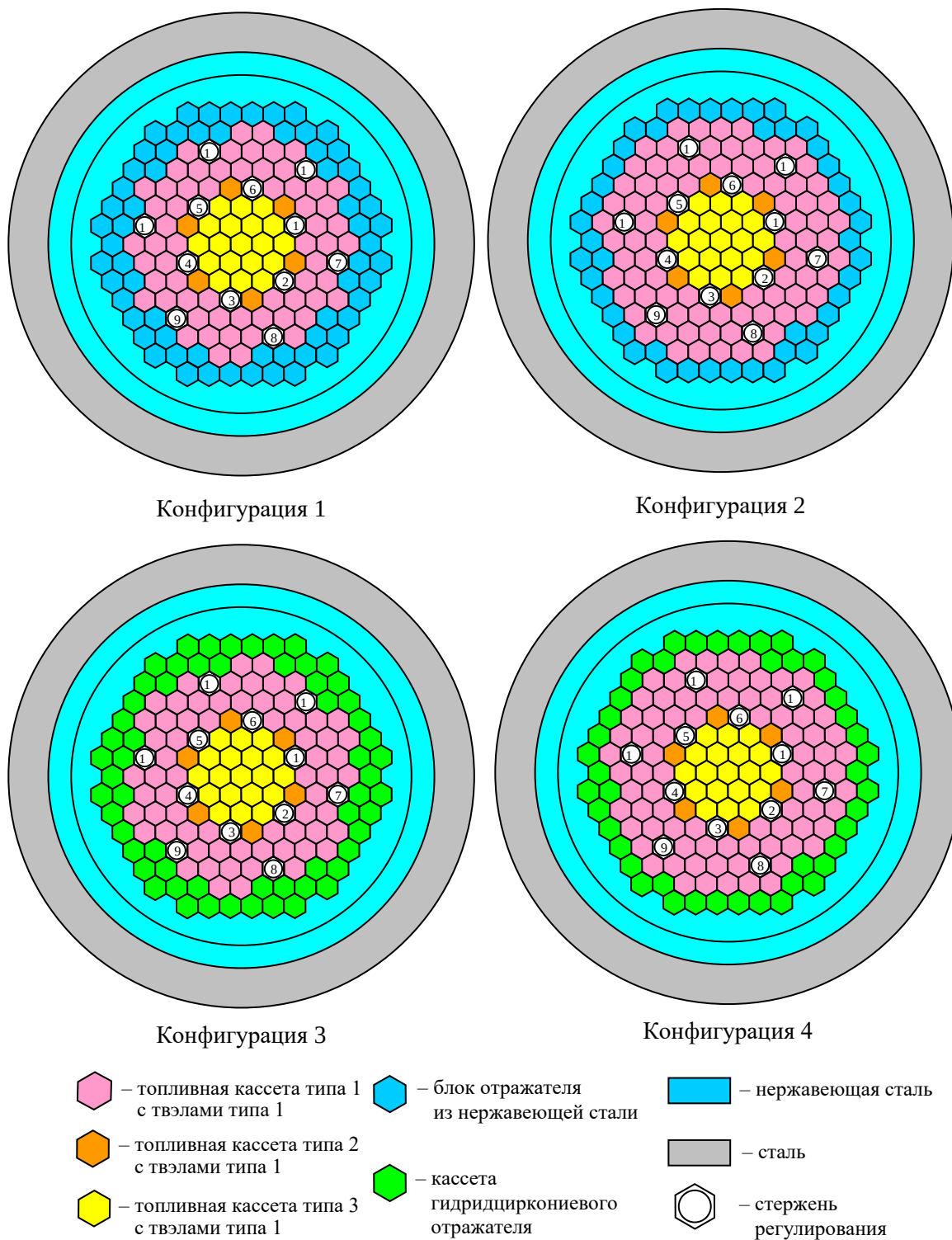


Рис. 13. Картограммы загрузки критических сборок конфигураций 1–4

Реактивность критических сборок измерялась методом обращенного решения уравнения кинетики [7, 8]. Для исключения пространственных эффектов реактивности измерения проводились с помощью шести ионизационных камер, расположенных через каждые 60° за боковым отражателем критической сборки. Кроме того, для сравнения полученных результатов надкритичность критических сборок иногда измерялась методом асимптотического периода, а подкритичность – методами умножения источника и анализа нейтронных флуктуаций в частотной области [9, 10]. Также метод отношения мощностей в критических состояниях до и после возмущения реактивности использовался для измерения эффективности стержней регулирования [11]. Экспериментальные результаты, полученные этими методами, в пределах погрешностей измерений совпадали с результатами, полученными методом обращенного решения уравнений кинетики.

Запас реактивности критических сборок конфигураций 2 и 4 определялся методом разгрузки (краткое описание использованного метода приведено в работе [12]) и для этих конфигураций критических сборок составил $5,8 \pm 0,3 \beta_{\text{эфф}}$ и $5,1 \pm 0,3 \beta_{\text{эфф}}$ соответственно. Эффективность 75 пластин с борным поглотителем нейтронов (^{10}B) в критической сборке конфигурации 4 составила $8,2 \pm 0,4 \beta_{\text{эфф}}$. Эффективность системы из 12 стержней регулирования в критических сборках конфигураций 2 и 4 составила $14,2 \pm 0,8 \beta_{\text{эфф}}$ и $13,8 \pm 0,8 \beta_{\text{эфф}}$ соответственно.

Результаты измерения методами Фейнман-альфа, спектральной плотности мощности и взаимной спектральной плотности мощности параметра кинетики $\beta_{\text{эфф}}/l$ на критической сборке конфигурации 2 составили $408 \pm 20 \text{ с}^{-1}$, $397 \pm 15 \text{ с}^{-1}$ и $413 \pm 15 \text{ с}^{-1}$ соответственно. Значение параметра кинетики $\beta_{\text{эфф}}/l$, измеренное методом спектральной плотности мощности в критической сборке конфигурации 4, составило $364 \pm 15 \text{ с}^{-1}$.

Экспериментальные данные представлены в таблицах 1–4 и на рис. 14 и 15. Суммарная (систематическая и статистическая) погрешность экспериментальных результатов дана для доверительной вероятности 0,68.

Таблица 1

Результаты измерения реактивности в критической сборке конфигурации 1 при различных положениях стержней регулирования

Глубина погружения стержней регулирования в активную зону, мм												Реактивность, $\beta_{\text{эфф}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$0,25 \pm 0,01$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	212 ± 1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	212 ± 1	0	0	0	0	0	0
0	95 ± 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	400 ± 1	0	0	0	0	0	0	0	213 ± 1	0	0	$-1,65 \pm 0,05$
0	0	0	0	400 ± 1	0	212 ± 1	0	0	0	0	0	$-1,63 \pm 0,05$
400 ± 1	0	400 ± 1	0	0	0	0	0	0	213 ± 1	0	0	$-3,43 \pm 0,14$
0	0	0	0	0	0	212 ± 1	0	0	400 ± 1	0	0	$-0,56 \pm 0,02$
0	0	0	0	0	0	400 ± 1	0	0	213 ± 1	0	0	$-0,56 \pm 0,02$

Таблица 2

**Результаты измерения реактивности в критической сборке конфигурации 2
при различных положениях стержней регулирования**

Глубина погружения стержней регулирования в активную зону, мм												Реактив- ность, $\beta_{эфф}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
400±1	400±1	400±1	0	340±1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	400±1	0	0	0	260±1	400±1	400±1	260±1	400±1	400±1	0
0	102±1	400±1	0	0	0	400±1	400±1	400±1	0	400±1	400±1	0
0	0	400±1	0	114±1	0	0	400±1	0	0	0	0	0
0	400±1	400±1	0	0	0	260±1	400±1	400±1	260±1	400±1	400±1	-1,43±0,04
0	0	400±1	0	400±1	0	260±1	400±1	400±1	260±1	400±1	400±1	-1,62±0,05
400±1	0	400±1	0	0	0	260±1	400±1	400±1	260±1	400±1	400±1	-1,63±0,05
0	102±1	400±1	0	0	0	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	-1,00±0,03
0	0	400±1	0	114±1	0	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	-1,09±0,03
400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	-8,4±0,5
0	0	400±1	400±1	0	400±1	260±1	400±1	400±1	260±1	400±1	400±1	-5,5±0,3

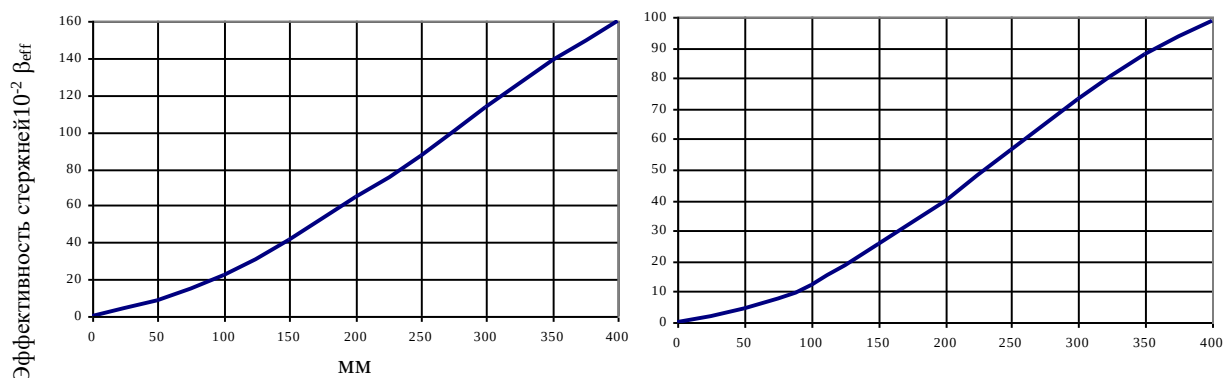


Рис. 14. Зависимость эффективности стержней регулирования от глубины погружения в активную зону критической сборки конфигурации 2
(слева – стержень регулирования № 5; справа – стержень регулирования № 10)

Таблица 3

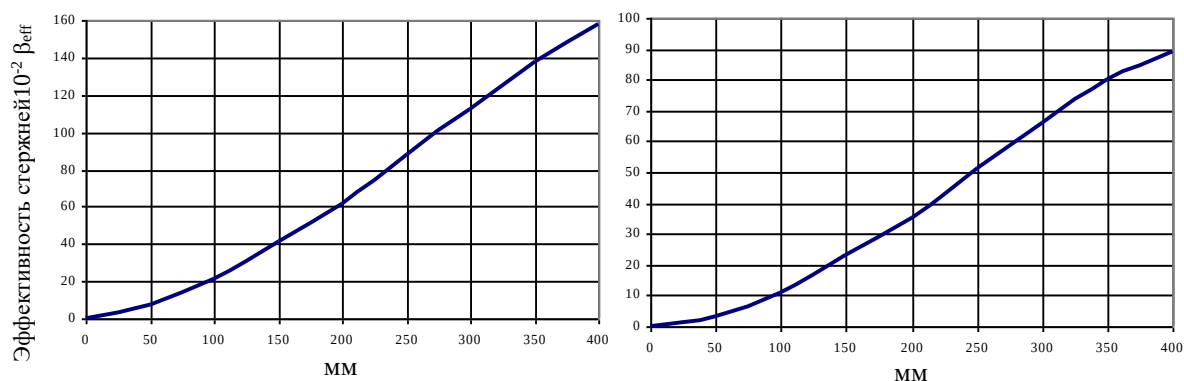
**Результаты измерения реактивности в критической сборке конфигурации 3
при различных положениях стержней регулирования**

Глубина погружения стержней регулирования в активную зону, мм												Реактивность, $\beta_{эфф}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06±0,01
0	0	0	0	0	0	83±1	0	0	0	0	0	0
0	37±1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	400±1	0	83±1	0	0	0	0	0	-1,57±0,05
0	0	0	0	0	0	83±1	0	0	400±1	0	0	-0,62±0,02

Таблица 4

**Результаты измерения реактивности в критической сборке конфигурации 3
при различных положениях стержней регулирования**

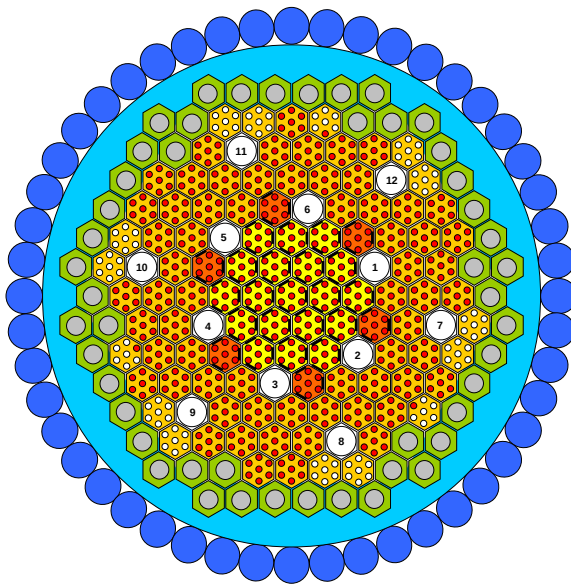
Глубина погружения стержней регулирования в активную зону, мм												Реактив- ность, $\beta_{эфф}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	0	400±1	0	0	0	180±1	400±1	400±1	180±1	400±1	400±1	0
0	0	400±1	0	0	0	280±1	400±1	400±1	0	400±1	400±1	0
0	0	400±1	0	0	0	0	400±1	400±1	300±1	400±1	400±1	0
0	0	400±1	0	111±1	0	180±1	400±1	400±1	0	400±1	400±1	0
400±1	400±1	400±1	0	232±1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	400±1	400±1	0	0	0	0	400±1	400±1	300±1	400±1	400±1	-1,49±0,05
0	400±1	400±1	0	0	0	280±1	400±1	400±1	0	400±1	400±1	-1,31±0,04
0	0	400±1	0	400±1	0	0	400±1	400±1	300±1	400±1	400±1	-1,47±0,05
0	0	400±1	0	400±1	0	280±1	400±1	400±1	0	400±1	400±1	-1,67±0,05
400±1	0	400±1	0	0	0	0	400±1	400±1	180±1	400±1	400±1	-1,61±0,05
0	0	400±1	0	111±1	0	180±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	-0,83±0,03
0	0	400±1	0	0	0	400±1	400±1	400±1	300±1	400±1	400±1	-0,99±0,03
400±1	400±1	400±1	0	232±1	0	400±1	0	0	0	0	0	-0,59±0,02
0	0	400±1	0	0	0	280±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	-0,90±0,03
0	0	400±1	400±1	0	400±1	180±1	400±1	400±1	180±1	400±1	400±1	-5,9±0,3
400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	400±1	-8,7±0,5



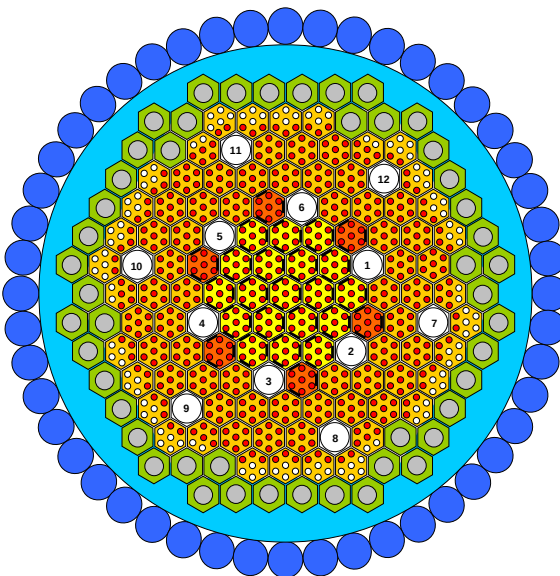
*Рис. 15. Зависимость эффективности стержней регулирования от глубины погружения в активную зону критической сборки конфигурации 4
(слева – стержень регулирования №5; справа – стержень регулирования № 10)*

3.2. Критические сборки конфигураций 5–8

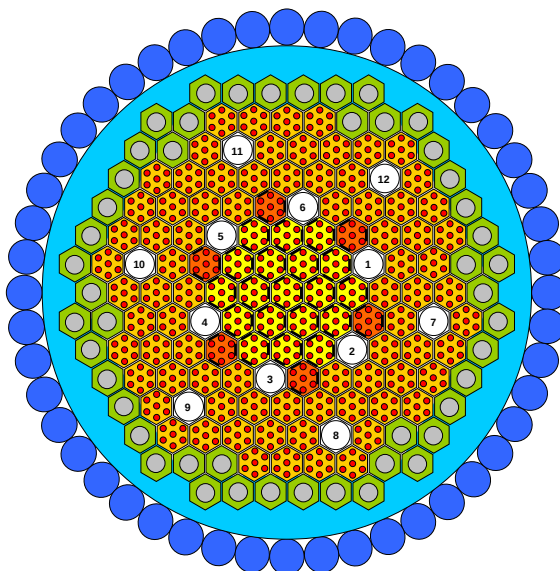
На рисунке 16 представлены картограммы загрузок уран-гидридциркониевых критических сборок конфигураций 5–8.



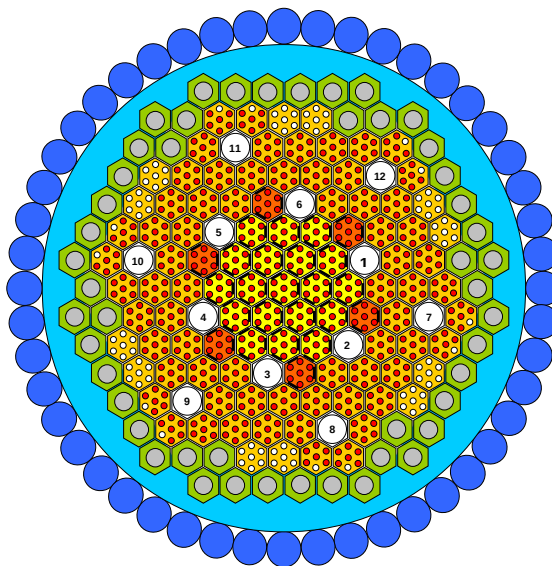
Конфигурация 5



Конфигурация 6



Конфигурация 7



Конфигурация 8

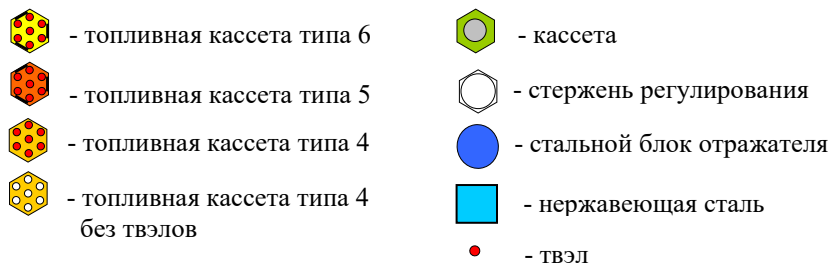


Рис. 16. Картограммы загрузки критических сборок конфигураций 5–8

Реактивность критических сборок конфигураций 5–8 измерялась теми же методами, что и критических сборок конфигураций 1–4.

Запас реактивности критической сборки конфигурации 7 определялся методами: матричным, одиночного стержня, разгрузки и балансным (краткое описание используемых методов в докладе [12]. Средне значение запаса реактивности этой конфигурации критической сборки составило $4,9 \pm 0,3 \beta_{\text{эфф}}$ (определялось с учетом погрешностей измерений каждым методом).

Экспериментальные данные представлены в таблицах 5-8 и на рис. 17 и 18. Общая погрешность (систематическая и статистическая) экспериментальных результатов даны для доверительной вероятности 0,68.

Таблица 5

Результаты измерения реактивности в критической сборке конфигурации 5 при различных положениях стержней регулирования

Глубина погружения стержней регулирования в активную зону, мм												Реактивность, $\beta_{\text{эфф}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$0,18 \pm 0,01$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	156	0
0	0	0	0	0	0	0	0	156	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	156	$-0,63 \pm 0,02$
0	0	0	0	0	0	0	0	156	0	0	400	$-0,63 \pm 0,02$
0	400	0	0	0	0	0	0	156	0	0	0	$-1,60 \pm 0,05$
0	0	0	0	400	0	0	0	156	0	0	0	$-1,60 \pm 0,05$
0	400	0	0	400	0	0	0	156	0	0	0	$-3,4 \pm 0,2$
0	400	0	0	400	0	0	0	400	0	0	400	$-4,4 \pm 0,2$
0	400	490	0	400	490	0	0	400	0	0	400	$-7,7 \pm 0,4$

Таблица 6

Результаты измерения реактивности в критической сборке конфигурации 6 при различных положениях стержней регулирования

Глубина погружения стержней регулирования в активную зону, мм												Реактивность, $\beta_{\text{эфф}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$0,14 \pm 0,01$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	141	0
0	0	0	0	0	0	0	0	136	0	0	0	0
0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	141	$-0,65 \pm 0,02$
0	0	0	0	0	0	0	0	136	0	0	400	$-0,65 \pm 0,02$
0	400	0	0	0	0	0	0	136	0	0	0	$-1,62 \pm 0,03$
0	0	0	0	400	0	0	0	136	0	0	0	$-1,61 \pm 0,03$
0	0	0	400	0	0	0	0	136	0	0	0	$-1,58 \pm 0,03$
0	0	0	0	0	0	400	400	400	400	400	400	$-4,0 \pm 0,2$
400	400	490	400	400	490	0	0	0	0	0	0	$-9,3 \pm 0,5$
400	400	490	400	400	490	400	400	400	400	400	400	$-14,0 \pm 0,7$

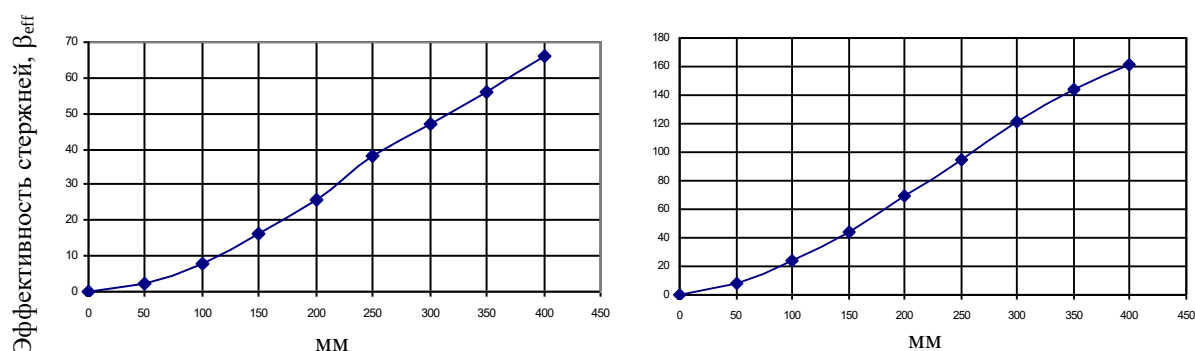
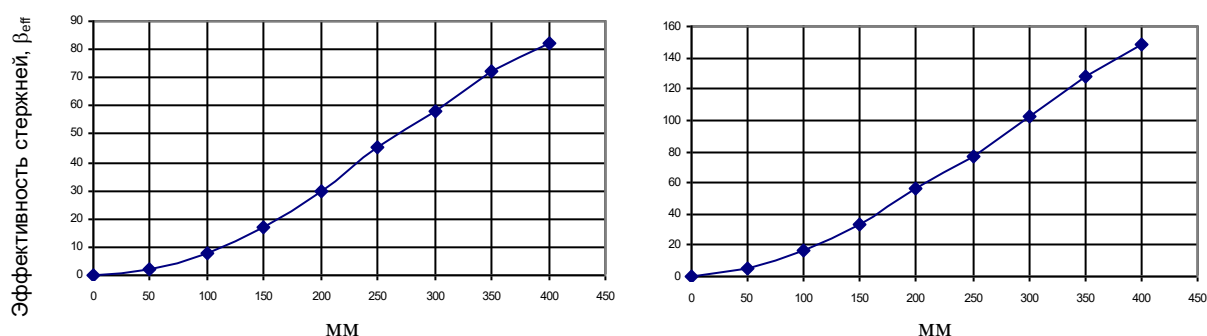


Рис. 17. Зависимость эффективности стержней регулирования от глубины погружения в активную зону для критической сборки конфигурации 6 (слева – стержень регулирования №12; справа – стержень регулирования №5)

Таблица 7

**Результаты измерения реактивности в критической сборке конфигурации 7
при различных положениях стержней регулирования**

Глубина погружения стержней регулирования в активную зону, мм												Реактивность, $\beta_{эфф}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
400	0	0	400	0	0	0	400	239	0	400	0	0
400	0	0	0	0	0	400	400	202	400	400	0	0
400	0	0	400	0	0	0	400	239	0	400	400	$-0,78 \pm 0,02$
400	0	0	400	400	0	0	400	239	0	400	0	$-1,50 \pm 0,03$
400	0	0	400	0	0	400	400	202	400	400	0	$-1,69 \pm 0,03$
400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	$-9,6 \pm 0,5$



*Рис. 18. Зависимость эффективности стержней регулирования от глубины погружения в активную зону для критической сборки конфигурации 7
(слева – стержень регулирования №12; справа – стержень регулирования №5)*

Таблица 8

**Результаты измерения реактивности в критической сборке конфигурации 8
при различных положениях стержней регулирования**

Глубина погружения стержней регулирования в активную зону, мм												Реактивность, $\beta_{эфф}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$0,23 \pm 0,01$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	172	0
0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	400	0	0	172	$-0,70 \pm 0,02$
0	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	172	$-1,65 \pm 0,03$
0	0	0	400	0	0	0	0	0	0	0	172	$-1,64 \pm 0,03$
400	0	0	400	0	0	400	400	400	400	400	400	$-8,1 \pm 0,5$
400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	$-14,9 \pm 0,7$

3.3. Критические сборки конфигураций 9–12

На рисунках 19–22 представлены картограммы загрузки критическихборок конфигураций 9–12. Составы активной зоны и отражателей и результаты измерения реактивности критическихборок представлены в таблице 9.

Экспериментальные данные представлены в таблицах 9 и 10. Суммарная погрешность (систематическая и статистическая) экспериментальных результатов дана для доверительной вероятности 0,68.

Реактивность критическихборок конфигураций 9–12 измерялась аналогично, как и критическихборок конфигураций 1–4.

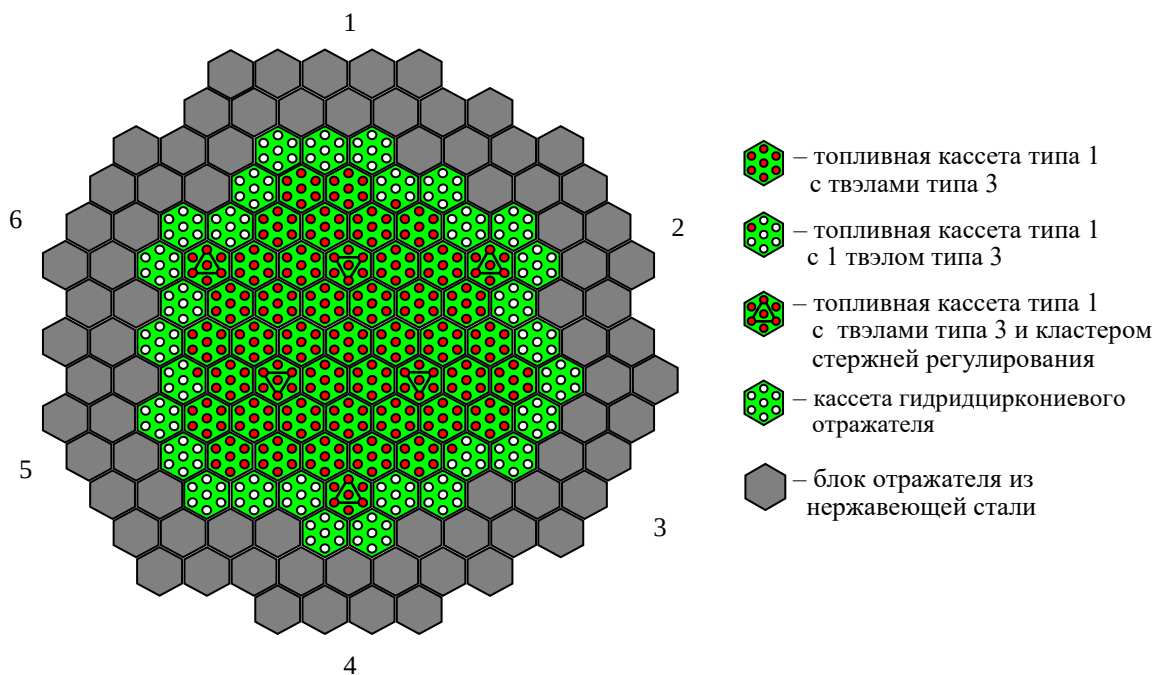


Рис. 19. Картограмма загрузки критической сборки конфигурации 9

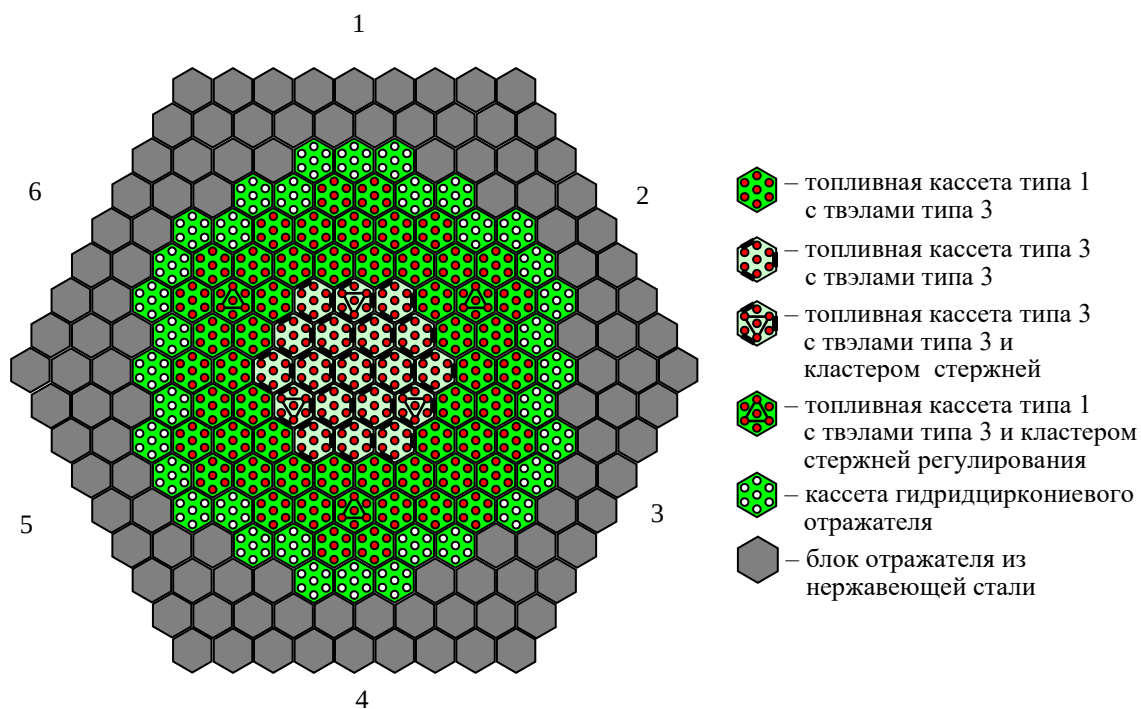


Рис.20. Картограмма загрузки критической сборки конфигурации 10

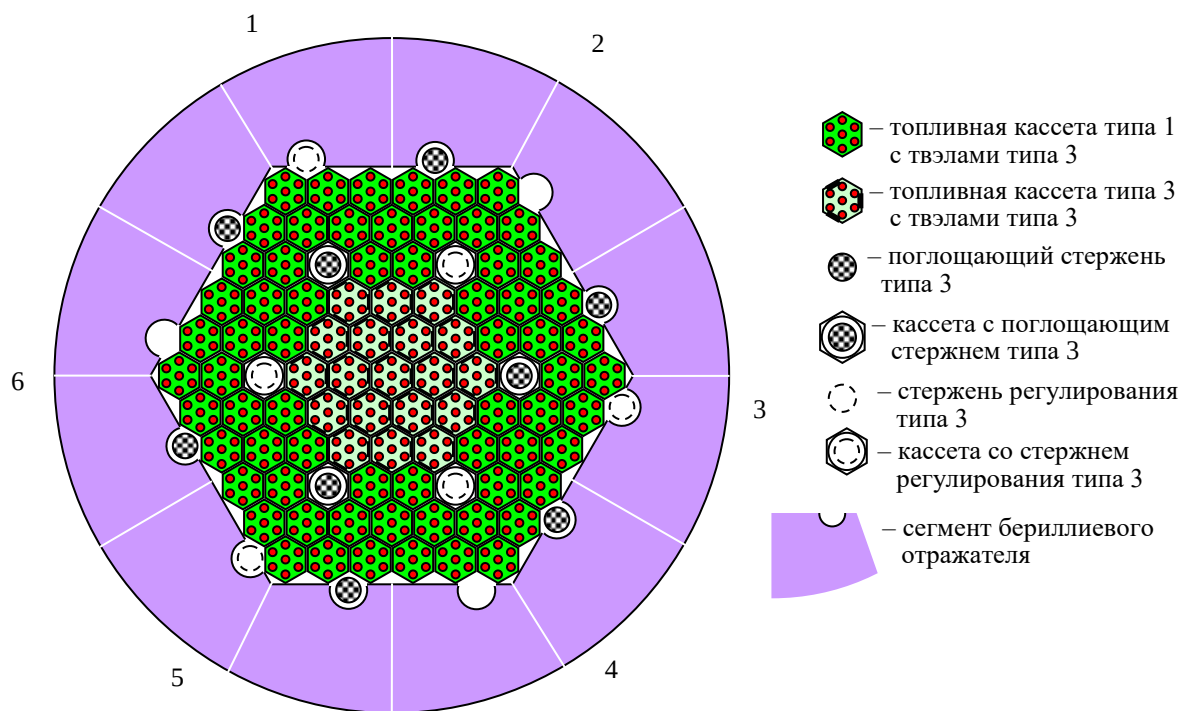


Рис. 21. Картограмма загрузки критической сборки конфигурации 11

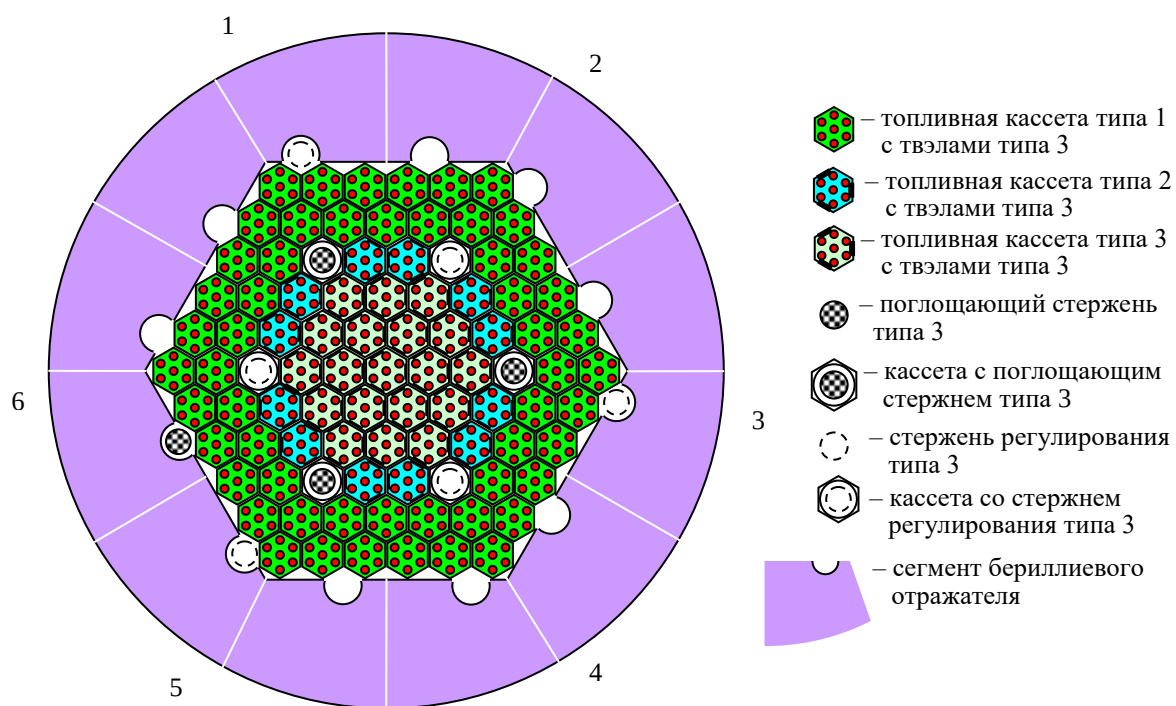


Рис.22. Картограмма загрузки критической сборки конфигурации 12

Таблица 9

Состав критических сборок конфигураций 9–12 и результаты измерения их реактивности

Номер конфигурации	Топливная кассета, шт.			Элемент отражателя, шт.			Поглощающий элемент, шт.		Результаты измерения реактивности, $\beta_{эфф}$
	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Кассета с гидридцирконием	Блок из нержавеющей стали	Бериллиевый сегмент	Кассета с поглощающим стержнем	Поглощающий стержень	
9	46 и 3 твэла	—	—	27	78	—	—	—	0,22±0,02
10	55	—	19	35	108	—	—	—	0,19±0,02
11	66	—	19	—	—	12	3	6	0,06±0,01
12	54	12	19	—	—	12	3	1	–0,08±0,01

Таблица 10

Эффективность стержней регулирования критических сборок конфигураций 9–12

Параметр	Номер конфигурации критической сборки			
	9	10	11	12
Эффективность одного стержня регулирования (номер стержня)	2,77 ± 0,14 (3)	1,71 ± 0,07 (3)	1,54 ± 0,05 (2)	1,44 ± 0,04 (2)
Эффективность двух стержней регулирования (номер стержня)	5,70 ± 0,30 (1 и 3)	—	3,15 ± 0,13 (2 и 6)	2,70 ± 0,11
Эффективность одного стержня регулирования (номер стержня)	2,76 ± 0,14 (5)	1,74 ± 0,07 (5)	1,50 ± 0,05 (4)	1,42 ± 0,04 (4)
Эффективность двух стержней регулирования (номер стержня)	—	—	2,00 ± 0,06 (1 и 4)	2,09 ± 0,06
Эффективность одного стержня регулирования (номер стержня)	0,71 ± 0,02 (4)	1,07 ± 0,04 (4)	0,47 ± 0,01 (3)	0,68 ± 0,02 (3)
Эффективность двух стержней регулирования (номер стержня)	—	—	0,96 ± 0,03 (3 и 5)	1,22 ± 0,04 (3 и 5)
Эффективность четырех стержней регулирования (номер стержня)	5,13 ± 0,30 (2, 4, 5, 6)	5,2 ± 0,3 (2, 4, 5, 6)	2,95 ± 0,12 (1, 3, 4, 5)	3,32 ± 0,13 (1, 3, 4, 5)
Эффективность шести стержней регулирования (номер стержня)	11,9 ± 0,6 (1-6)	8,9 ± 0,4 (1-6)	6,61 ± 0,40 (1-6)	6,49 ± 0,39 (1-6)

Заключение

Экспериментальные данные, полученные на критических стендах «Кристалл» и «Гиацинт» на уран-гидридциркониевых размножающих системах с 21%, 36% и 45% обогащением по урану-235 могут быть использованы при верификации программных кодов и библиотек ядерных данных для расчета нейтронно-физических характеристик реакторных систем с гидридциркониевым замедлителем.

Список литературы

1. Экспериментальные исследования по физике реактора передвижной атомной электростанции «Памир» / Гульник С.И., Жук И.В., Малыхин А.П., Мандик С.Г., Сикорин С.Н., Ярошевич О.И. // Проблемы использования ядерной энергии.

- Сборник докладов научного семинара, посвященного 85-летию академика А.К.Красина. Под ред. А.А. Михалевича, С.Е. Чигринова. 1996. С.34-39.
2. IRPhEP Handbook: International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments. Paris: OECD Nuclear Energy Agency.
 3. ICSBER Handbook: International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project. Paris: OECD Nuclear Energy Agency.
 4. Исследовательские ядерные установки государств-участников Содружества Независимых Государств / Ред. сост. М.К. Виноградов, В.Н. Федюлин. – М.: Гелиос АРВ, 2016. С. 16–27.
 5. Исследовательские ядерные установки государственного научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси. / Составители: С.Н. Сикорин, И.С. Солтан, Т.К. Григорович. – Минск: РУП «Издательский дом «Беларуская навука», 2018. С. 17–29.
 6. Кузьмин А.В., Михалевич А.А., Сикорин С.Н. Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь. М.: Беларуская навука, 2023. С. 262–276.
 7. Полозов С.А., Сикорин С.Н. Цифровой реактиметр на базе микроЭВМ и аппаратуры КАМАК // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. 1987. № 4. С. 87-92.
 8. Бузницкий Г.И., Головач А.И., Гриневич Ф.А., Лукьянец В.В., Сидорук Н.М., Сикорин С.Н. Аналоговый измеритель реактивности ядерного реактора // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. 1992. № 1. С. 22-27.
 9. Keppin G.R. Physics of Nuclear Kinetics / Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1965. 435 p.
 10. Uhrig R.E. Random Noise Techniques in Nuclear Reactor Systems / The Roland Press Company, New York, N.Y., 1970. 490 с.
 11. Сикорин С.Н., Ярошевич О.И. Определение эффективности органов регулирования реактора по измерению отношения мощности в критических состояниях до и после возмущения реактивности // Атомная энергия. 1993 Т. 74. Вып. 2. С.161-163.
 12. Determination of Physical Reactor Parameters of Transportable NPP at Physical and Power Reactor Start-Up / A.P. Malykhin, S.N. Sikorin, O.I. Yaroshevich, V.A. Levadnyi // A Symposium on Nuclear Reactor Surveillance and Diagnostics SMORN VII, 19-23 June, 1995, Avignon, France. Paris. Proceedings. Vol.2. 1996. С. 48-56.