

## Экспериментальные исследования защиты на стенде РИЗ

С. П. Белов, В. А. Дулин, Ю. А. Казанский, В. И. Попов, С. Г. Цыпин

Описывается стенд с реактором нулевой мощности, предназначенный для изучения процессов, происходящих в части защиты, непосредственно прилегающей к активной зоне реактора. Знание процессов, происходящих в этой части защиты (формирование нейтронного спектра и образование мощного  $\gamma$ -излучения), позволяет правильно рассчитывать размеры и вес всей защиты реакторов.

Приводятся результаты измерений на стенде спектров нейтронов и изучения защитных материалов (железа, никеля и борированного никеля).

Изучение процессов, происходящих в части защиты, непосредственно прилегающей к активной зоне реактора, очень важно, поскольку здесь формируется нейтронный спектр и образуется мощное захватное  $\gamma$ -излучение. Эти процессы существенно влияют на размеры и вес всей защиты. Экспериментально изучать эти достаточно сложные вопросы наиболее целесообразно на реакторе нулевой мощности, где можно легко устанавливать и снимать исследуемую защиту.

Использование реактора нулевой мощности для изучения вторичного  $\gamma$ -излучения удобно также и с точки зрения возможностей быстро изменять уровни мощности в широком диапазоне, получать хорошие соотношения между фоном и измеряемым эффектом и изменять размеры и конструкции исследуемых защит.

Для экспериментального исследования защиты был построен стенд РИЗ с уран-водным реактором нулевой мощности.

При проектировании стенда учитывали возможность изменения выходящего спектра нейтронов, удобство размещения исследуемых защитных материалов и проведения исследований. Поскольку основным назначением стенда РИЗ являлось изучение выхода захватного  $\gamma$ -излучения и спектров нейтронов, главное внимание было уделено получению оптимального соотношения между потоками нейтронов и  $\gamma$ -излучения на рабочей поверхности стенда.

### Описание активной зоны, защитных экранов и системы управления

Используемый уран-водный реактор нулевой мощности (прототип такого реактора был разработан под руководством В. А. Кузнецова) имеет цилиндрическую активную зону диа-

метром 335 мм и высотой 275 мм, заполненную дистиллированной водой, в которую помещена решетка с твэлами, представляющими собой герметически упакованную в трубку из нержавеющей стали двуокись обогащенного до 90% урана. Каждый стержень содержит 10,5 г  $U^{235}$ ; общая загрузка активной зоны по  $U^{235}$  около 3,5 кг.

Боковая защита активной зоны состоит из слоев железа, воды и бетона общей толщиной около 130 см (рис. 1). Нижняя защита представляет собой железо-водную смесь (60 об.% железа) общей толщиной 35 см. На верхнем торце активной зоны помещена защита из слоя карбида бора толщиной 4,5 г/см<sup>2</sup> и слоя висмута толщиной 8,5 см; диаметр этой защиты 110 см; за ней идет кольцо шириной 35 см, состоящее из карбида бора (7 г/см<sup>2</sup>) и свинца (6,5 см) (см. рис. 1).

Назначение защиты верхнего торца активной зоны:

1) существенно уменьшить выход жесткого  $\gamma$ -излучения из активной зоны, конструкций и боковых отражателей и защит;

2) ослабить мягкую часть спектра выходящих из активной зоны нейтронов; эту задачу выполняет помещенный непосредственно на торце активной зоны карбид бора;

3) снизить влияние исследуемых защит на реактивность реактора.

Внешний вид защиты и рабочей поверхности стенда на верхнем торце реактора приведен на рис. 2.

Управление реактором осуществляется снизу, из расположенного под железо-водной защитой помещения. В качестве регулирующих и аварийных стержней служат стержни из бора, расположенные в активной зоне по диаметру 215 мм. Для аварийной остановки реактора предусмотрен также быстрый слив воды из активной зоны.

Детекторы контрольной и аварийной аппаратуры (камеры с борным покрытием и счетчики, наполненные трехфтористым бором) расположены в водных слоях боковой защиты на радиусах 32 и 62 см от центра активной зоны. Приборы контрольной аппаратуры и каналов аварийной защиты находятся в пультовом помещении (рис. 3).

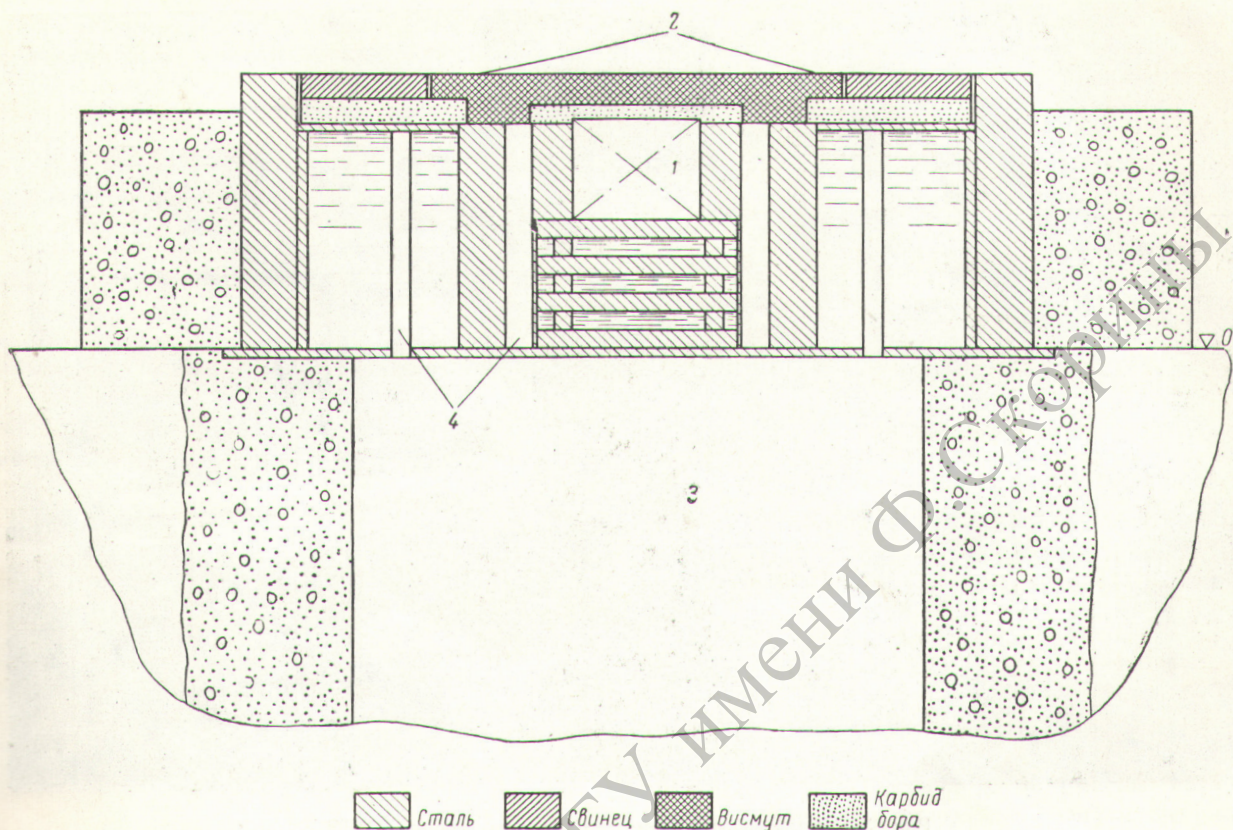


Рис. 1. Схема расположения активной зоны и защитных экранов реактора стенда РИЗ:

1 — активная зона; 2 — рабочая поверхность; 3 — помещение для системы управления и защиты; 4 — каналы для детекторов контрольной аппаратуры.

Реактор снабжен автоматом для вывода на мощность с нулевого уровня и поддержания заданного уровня мощности, системой дистанционного (с пульта) заполнения активной зоны водой.

Монитором мощности реактора служит камера деления с  $\text{Th}^{232}$ , которая с помощью дистанционного устройства перемещается в специальном канале вдоль образующей активной зоны. Это позволяет расширить диапазон измерения скоростей счета в 15—20 раз.

Поскольку стенд используется в основном как источник нейтронов с реакторным спектром и изменение физических параметров реактора связано лишь с изменением его реактивности за счет добавления исследуемых материалов с верхнего торца, активная зона собрана так, чтобы при полном заполнении ее водой и отсутствии исследуемого материала избыток реактивности не превышал 0,3%. Это значительно упрощает управление реактором и повышает его безопасность.

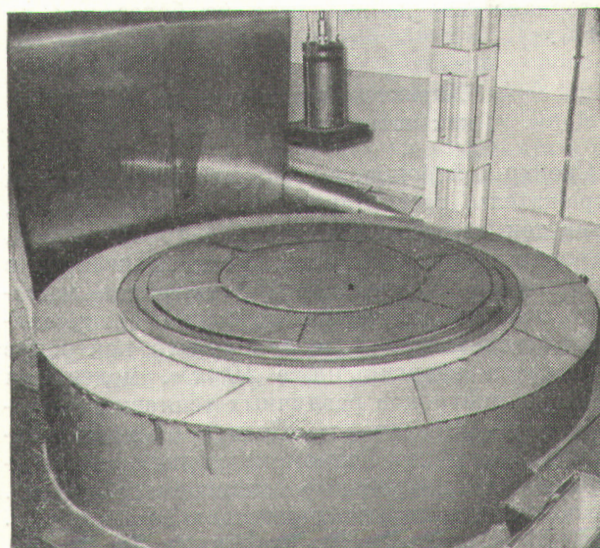


Рис. 2. Внешний вид защиты и рабочей поверхности реактора стенда РИЗ (вид сверху).



Рис. 3. Пульт управления реактором стенда РИЗ.

Верхний отражатель из карбида бора и висмута позволяет снизить влияние исследуемого материала на реактивность не более чем на 0,1%.

#### Характеристики стенда как источника излучений

Спектр нейтронов, выходящих через верхний отражатель, рассчитанный В. П. Кочергиным, приведен на рис. 4. За счет фильтрации бором, находящимся в отражателе, спектр нейтронов существенно жестче спектра нейтронов теплового реактора. Изменение толщины бора в отражателе позволяет изменять спектр нейтронов в области энергий ниже 10 кэв, моделируя спектры нейтронов различных тепловых и промежуточных реакторов. Спектр быстрых нейтронов измерялся однокристалльным сцинтилляционным нейтронным спектрометром [1]. Результаты измерений представлены на рис. 5. Сплошной линией показан спектр деления  $U^{235}$ , пунктиром — тот же спектр с учетом ослабления висмутом по сечению выведения.

Спектр  $\gamma$ -излучения, выходящего с поверхности висмутовой защиты, измеренный однокристалльным сцинтилляционным спектрометром выше энергий 3 Мэв, показан на рис. 6. Жесткая часть спектра, очевидно, обусловлена захватным  $\gamma$ -излучением в железе (конструкция, отражатель и т. д.).

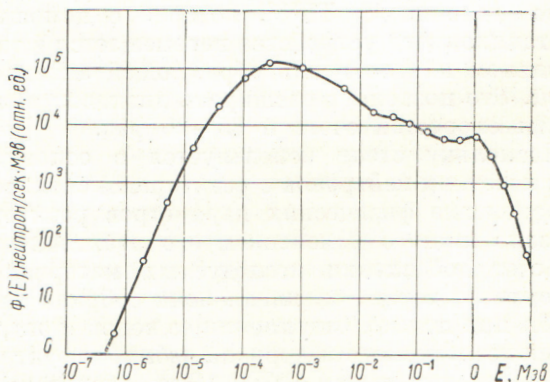


Рис. 4. Расчетный спектр нейтронов, выходящих через верхний отражатель реактора стенда РИЗ.

Спектры нейтронов и  $\gamma$ -излучения измерялись в одинаковых геометрических условиях и приведены к одной мощности реактора. Это позволяет оценить соотношение между потоками нейтронов и  $\gamma$ -излучения над рабочей поверхностью стенда. Отношение числа нейтронов с энергией выше  $0,5 \text{ Мэв}$  к числу  $\gamma$ -квантов с энергией выше  $3 \text{ Мэв}$  оказалось равным  $\sim 20$ . Оцененное с привлечением расчетного спектра отношение полного числа нейтронов к  $\gamma$ -излучению с энергией выше  $1 \text{ Мэв}$ , полученное по измерениям со стильбеновым кристаллом (в интервале  $1-3 \text{ Мэв}$ ), составляет  $\sim 7$ .

Полученное достаточно хорошее соотношение между потоками нейтронов и  $\gamma$ -излучения позволяет исследовать спектры нейтронов и даже

их угловое распределение, измерять выходы вторичного  $\gamma$ -излучения из различных исследуемых материалов, проводить сравнение спектров захватного  $\gamma$ -излучения. Примером последних измерений может служить работа [2], где были обнаружены существенные деформации спектра  $\gamma$ -излучения для таких важных конструкционных материалов, как никель, железо, медь. На описываемом стенде проведен большой комплекс работ по изучению выхода захватного  $\gamma$ -излучения для ряда конструкционных и защитных материалов по методике, изложенной в работе [3].

Ниже приводятся результаты измерений для железа и никеля.

### Изучение выхода захватного излучения из железа и никеля

На рабочей поверхности стенда размещались призмы различной толщины, собранные из листов железа размером  $900 \times 1000 \times 9 \text{ мм}$ , никеля размером  $800 \times 800 \times 8 \text{ мм}$  и листов борированного никеля с 2 вес.% бора диаметром  $900 \text{ мм}$  и толщиной  $15-20 \text{ мм}$ .

Для уменьшения фона нейтронного излучения в помещении использовалась защита из карбида бора, парафина и смесей карбида бора, парафина и воды. Эта защита окружала призму с боков и помещалась на поверхности исследуемой защиты.

Детектор  $\gamma$ -излучения также был окружен борно-парафиновой и висмутовой защитой. Он располагался на расстояниях, больших  $100 \text{ см}$  от поверхности исследуемой защиты. Для измерения фона телесный угол детектор — поверхность призмы перекрывался висмутовой защитой толщиной  $8-9 \text{ см}$ . В области энергий  $\gamma$ -излучения  $3-6 \text{ Мэв}$  отношение эффекта к фону даже для железа толщиной  $40 \text{ см}$  составляло единицу.

Как и в работе [3], конечным результатом опытов было получение коэффициентов вторичного излучения  $\beta$  — отношения полного числа  $\gamma$ -квантов с энергией выше некоторого порога  $E_{\text{пор}}$ , выходящих с поверхности защиты, к полному числу нейтронов, выходящих с той же поверхности.

В таблице приведены коэффициенты вторичного излучения и относительная зависимость выхода захватного  $\gamma$ -излучения из никеля, борированного никеля и железа в функции толщины защиты. Для железа  $E_{\text{пор}} = 5 \text{ Мэв}$ , для никеля и борированного никеля  $E_{\text{пор}} = 7,5 \text{ Мэв}$ .

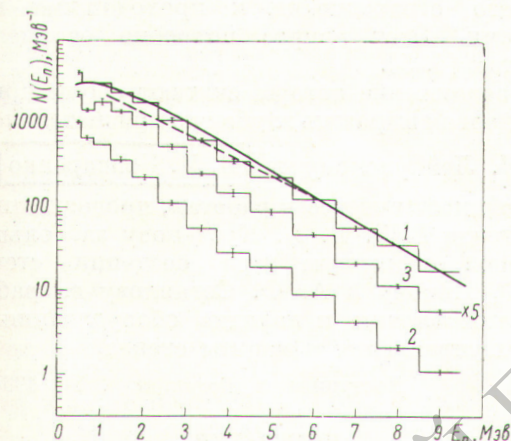


Рис. 5. Спектры быстрых нейтронов, измеренные сцинтилляционным спектрометром.

1 — в центре рабочей поверхности стенда, 2, 3 — на расстояниях 40 см и 1 м от центра рабочей поверхности стенда соответственно.

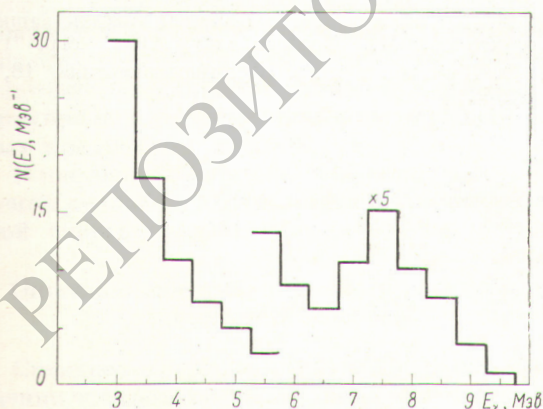


Рис. 6. Спектр  $\gamma$ -излучения, измеренный сцинтилляционным  $\gamma$ -спектрометром на высоте 1 м над центром рабочей поверхности реактора стенда РИЗ.

Результаты измерений на стенде РИЗ

Железо				Никель				Борированный никель (2 вес. % бора)			
Толщина, см	Относительный выход $\gamma$ -излучения	Отношение потоков $\gamma$ -излучения	$\beta$ , %	Толщина, см	Относительный выход $\gamma$ -излучения	Отношение потоков $\gamma$ -излучения	$\beta$ , %	Толщина, см	Относительный выход $\gamma$ -излучения	Отношение потоков $\gamma$ -излучения	$\beta$ , %
5,5	0,88	14,1	0,80	4,8	0,81	15,4	1,06	4,7	0,54	—	—
10	1	10,3	1,03	9,6	1	9,5	1,47	9,4	0,43	1,6	1,07
20	0,78	8,2	1,21	20	0,69	6,4	2,12	13,1	0,32	—	—
40	0,36	7,6	1,17	30	0,36	7,3	1,82	20,3	0,20	2,0	1,0
								28	0,10	—	0,96

В работе [3] приводятся коэффициенты вторичного излучения для  $Po - \alpha - Be$ -источника, помещенного внутрь плоского слоя железа. Сравнение результатов настоящей работы с данными работы [3] для железа показывает, что при толщинах более 20 см коэффициенты вторичного излучения в пределах точности измерений (для результатов настоящей работы ошибки составляют 10—13%) совпадают, несмотря на различие нейтронных спектров таких источников, как  $Po - \alpha - Be$ -источник и реактор РИЗ. При меньших толщинах может наблюдаться значительное различие вследствие того, что при измерениях на  $Po - \alpha - Be$ -источнике сказывается влияние слоя железа, расположенного ниже источника нейтронов.

В случае двухкомпонентной защиты, состоящей из тяжелой и водородсодержащей сред, захватное  $\gamma$ -излучение существенно увеличивается из-за поглощения в тяжелой защите нейтронов, отраженных водородсодержащей средой. Отношения потоков  $\gamma$ -излучения при контакте тяжелой защиты с водой и блокировке нейтронов, отраженных карбидом бора (для этого достаточна толщина  $B_4C$ , равная  $\sim 0,5 \text{ г/см}^2$ ), также приведены в таблице. Следует отметить, что эти отношения зависят от

толщины последующей защиты из-за различного углового распределения  $\gamma$ -излучения, рожденного отраженными и проходящими нейтронами. Этот вопрос подробно освещен в работах [4, 5].

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить глубокую признательность А. И. Лейпунскому и **И. И. Бондаренко** за постоянный интерес к работам, проводившимся на стенде РИЗ, В. А. Кузнецову за большую помощь, оказанную при создании стенда, А. Ф. Попову и А. Ф. Сотникову за работы по изготовлению и наладке оборудования системы управления и защиты стенда.

Поступила в Редакцию 2/IV 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Дулин и др. «Приборы и техника эксперимента», № 2, 39 (1961).
2. А. Т. Баков и др. ЖЭТФ, 44, 3 (1963).
3. А. Т. Баков и др. «Атомная энергия», 13, 31 (1962).
4. Д. Л. Бродер и др. Вопросы физики защиты реакторов. М., Госатомиздат, 1963, стр. 112.
5. Б. Ф. Громов и др. «Атомная энергия», 18, 69 (1965).

