

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК АЗЕРБАЙДЖАНА
ИНСТИТУТ РАДИАЦИОННЫХ ПРОБЛЕМ**

На правах рукописи

ЛАЧЫН АНВАР оглы ТАЙЫБОВ

**РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КИНЕТИКИ
МОДЕРНИЗИРОВАННОГО РЕАКТОРА ИБР-2**

2207.01 – Атомная и ядерная физика

2225.01 – Радиационное материаловедение

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии по физике

БАКУ – 2013

Работа выполнена в Институте радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана и в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

А.А. Гарибов

член-корр. НАНА., д.х.н., проф.

Р.Н. Мехтиева

кандидат физ.-мат.наук

Научный консультант:

Ю.Н. Пепельшев

кандидат физ.-мат. наук

Официальные оппоненты:

А. К. Абиев

доктор физ.-мат.наук, проф.

С. К. Абдулвагабова

доктор физ.-мат. наук, проф.

Ведущая организация: **Институт физики им. Г.М. Абдуллаева НАН Азербайджана (лаборатория “Ядерных исследований”).**

Защита состоится « 01 » Марта 2013 г. в 15⁰⁰ ч. на заседании Диссертационного совета D 01.221 при Институте радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана по адресу: г. Баку, ул. Б. Вахабзаде 9, AZ1143, факс (99412) 4393391, e-mail: nukl@box.az.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института радиационных проблем НАН Азербайджана.

Автореферат разослан « 29 » января 2013 г.

Ученый секретарь

**Диссертационного совета D. 01.221,
доктор физико-математических наук**

О.А.Самедов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В кинетике ядерных реакторов эффективная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эф}}$ и время жизни мгновенных нейтронов τ являются одними из основных параметров. Уникальное сочетание конструктивных особенностей реактора ИБР-2М и его свойств ставит этот реактор в ряд установок, не имеющих аналогов в мировой практике реакторостроения.

Сложность реактора ИБР-2М потребовала принципиально нового подхода к исследованию его характеристик. Во-первых, по сравнению с реакторами стационарного типа чувствительность реактора ИБР-2М к шумам внешней реактивности на порядок выше из-за того, что кинетика реакторов типа ИБР-2М определяется импульсной долей запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{и}}$, величина которой существенно меньше эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эф}}$. Поэтому при переходе реактора из режима непрерывной мощности в импульсный флуктуации мощности автоматически возрастают в $\beta_{\text{эф}}/\beta_{\text{и}}$ раз, т.е. для реакторов на Pu^{239} в 15 раз, а на U^{235} в 30-40 раз. Во-вторых, частотный диапазон высокой чувствительности, определяемый отношением $\beta_{\text{эф}}/\tau$, где τ — среднее время жизни мгновенных нейтронов, равен $0 \div 5$ кГц. Для сравнения отметим, что у реакторов на тепловых нейтронах этот диапазон не превышает ~ 20 Гц. В-третьих, наличие вращающихся элементов подвижного отражателя требует исследования большого числа параметров, не свойственных реакторам стационарного типа. В-четвертых, импульсный характер энерговыделения при наличии, как уже было отмечено выше, широкого "окна" чувствительности приводит к появлению различных трудно прогнозируемых процессов, влияющих на динамику реактора и его основные эксплуатационные характеристики. Поэтому при пуске реактора ИБР-2М основное внимание уделялось расчетному и экспериментальному исследованию параметров кинетики реактора и в первую очередь изучению условий, обеспечивающих надежную и безопасную работу реактора.

Для импульсных реакторов типа ИБР-2 величина τ определяет длительность импульса мощности и наряду с $\beta_{\text{эф}}$ используется в анализе условий безопасной работы реактора. Численные значения параметров кинетики зависят от состава и геометрии активной зоны. По сравнению с реактором ИБР-2 активная зона модернизированного реактора ИБР-2М более компактная. В то же время конструкция ИБР-

2М такова, что экспериментальное измерение $\beta_{эф}$ и τ традиционными методами невозможно. Кроме того, как правило, эти параметры нельзя измерить отдельно. Качественно величину τ для ИБР-2М можно оценить из анализа формы импульса мощности, а $\beta_{эф}$ - из анализа шумов энергии импульсов при условии, что величина τ уже была оценена ранее. Отсюда расчет $\beta_{эф}$ и τ для ИБР-2М приобретает особое значение. Для модернизированного реактора ИБР-2М, также как и для ИБР-2, имеются две основные причины, вызывающие флуктуации энергии импульсов. Это стохастический характер процесса деления и размножения нейтронов и флуктуации внешней реактивности. Стохастический характер шумов доминирует в колебаниях мощности при малой интенсивности нейтронов. Колебания внешней реактивности вызывают флуктуации импульсов на любом уровне мощности. На номинальной мощности 2МВт флуктуации энергии импульсов значительны (до $\pm 20\%$). На малой мощности менее 1Вт флуктуации могут достигать 100%. Флуктуации мощности отрицательно влияют на динамику реактора, процесс его регулирования, пуска, на работу экспериментальной аппаратуры и т.д. С другой стороны, наличие больших флуктуаций мощности в реакторе ИБР-2М имеет свои плюсы. Исследование стохастических флуктуаций позволяет оценить некоторые ядерно-физические параметры активной зоны, такие как среднее время жизни мгновенных нейтронов, абсолютный уровень мощности и т.д. Исследование флуктуаций на большом уровне мощности позволяет оценить источник возмущений внешней реактивности и диагностировать динамику его изменения, что напрямую связано с обеспечением безопасной работы реактора.

Цель работы состояла в расчетном и экспериментальном исследовании параметров кинетики модернизированного реактора ИБР-2.

В соответствии с поставленной целью в работе решались следующие задачи:

- тестовые исследования по влиянию используемых приближений на расчетные величины $\beta_{эф}$ и τ в реакторе ИБР-2М;

- тестовые исследования по выбору данных по V_d (число запаздывающих нейтронов на один акт деления) для расчета $\beta_{эф}$ и τ в реакторе ИБР-2М;

- исследование стохастических флуктуаций реактора ИБР-2М;
- оценка параметров кинетики реактора ИБР-2М по стохастическим шумам мощности.

Научная новизна диссертации заключается в том, что в ней для расчета выбран S_n -метод и показано, что этот метод позволяет получить для реакторов на быстрых нейтронах с малым размером активной зоны более точный результат. Другие методы расчета, например, метод Монте-Карло, в данной задаче давали существенно заниженные результаты. Показано некоторое увеличение $\beta_{эф}$ и τ при уменьшении размеров активной зоны ИБР-2 в радиальном направлении. Получены результаты исследования стохастических флуктуаций, которые позволяют оценить некоторые ядерно-физические параметры активной зоны: среднее время жизни мгновенных нейтронов, интенсивность источника спонтанных нейтронов, абсолютный уровень мощности и т.д.

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные в ней результаты позволили использовать их в уравнениях кинетики для более точного описания динамики быстрых процессов в импульсе мощности, что повышает безопасность модернизированного ИБР-2.

Основные защищаемые положения:

- Тестовые исследования по выбору данных V_d для расчета $\beta_{эф}$ и τ в реакторе ИБР-2М.
- Тестовые исследования по влиянию используемых приближений на расчетные величины $\beta_{эф}$ и τ в реакторе ИБР-2М.
- Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов в ИБР-2М.
- Исследования стохастических шумов энергии импульсов реактора ИБР-2М.
- Связь параметров шумов с параметрами кинетики.
- Экспериментальная оценка параметров кинетики реактора ИБР-2М по стохастическим шумам мощности.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: Международной конференции «Перспективы использования ядерной энергии в мирных целях» (Баку, ноябрь 2010 г.), «Перспективы использования

ядерной энергии в мирных целях» (Баку, ноябрь 2011 г.), Международной конференции «Nuclear science and its application» (Институт ядерной физики, Узбекистан, сентябрь 2012 г.), International Meeting «Reactor Noise Knowledge Transfer for Research and Test Reactors» (Prague, Czech Republic, October, 2012) и на семинарах Института радиационных проблем НАН Азербайджана, Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (Дубна, 2010 -2012 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных статей в реферируемых международных журналах, 2 препринта, а также 5 тезисов в сборниках трудов различных международных конференций.

Объем, структура и основное содержание диссертации. Диссертация содержит 149 страниц машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, включающих 41 параграфов, 30 рисунка, 9 таблиц, заключения и списка литературы из 150 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту, и кратко изложено основное содержание диссертационной работы.

В первой главе дан общий обзор аperiodических и периодических импульсных реакторов, действующих (или действовавших) в разных странах, принципы работы этих устройств, их применение и подробно освещены теория, методы и программы для расчета кинетики импульсных реакторов.

Во второй главе приведены подробное описание конструкции реактора ИБР-2 до и после модернизации, процесс модернизации и его основные характеристики. В связи с выработкой ресурса основных узлов реактора, а также с целью развития и совершенствования реактора была разработана концепция модернизации ИБР-2. Концепция модернизации реактора ИБР-2 предусматривает выполнение работ, включая разработку, изготовление и монтаж реакторного оборудования. В тоже время с учетом опыта эксплуатации реактора и проведения физических исследований данная концепция содержит ряд новых технических решений, заметно улучшающих эксплуатационные и физические характеристики

реактора, что позволит говорить о создании в процессе модернизации фактически нового реактора ИБР-2М [1, 2].

С января 2007 г. после прекращения работы реактора на физический эксперимент проводятся работы по модернизации ИБР-2 в соответствии с «Программой работ реактора ИБР-2 в режиме временного останова (2007-2010 гг.)».

Программа развития и совершенствования реактора ИБР-2 предполагала три направления работ [3]:

- улучшение основных параметров реактора,
- повышение безопасности и эксплуатационной надежности реактора,
- обновление основного оборудования реактора.

В ходе модернизации ИБР-2 замене на новые подлежали следующие узлы и системы реактора:

- корпус реактора,
- топливная загрузка,
- стационарные отражатели с откатными защитными устройствами,
- система управления и защиты, включая исполнительные механизмы органов регулирования и аварийной защиты, аппаратуру контроля и управления реактором, систему контроля технологических параметров и пульт реактора,
- система радиационного контроля,
- замедлители,
- система охлаждения криогенных замедлителей.

Это позволило не только улучшить основные параметры реактора, но и повысить безопасность и эксплуатационную надежность реактора. В 2006 г. на сборочном участке ТВС (тепловыделяющие сборки) в ОИЯИ были изготовлены тепловыделяющие сборки для топливной загрузки активной зоны реактора ИБР-2М. Первым этапом работ по демонтажу отработанного оборудования ИБР-2 стала разгрузка активной зоны реактора ИБР-2, проведенная в первой половине 2007 г. После выгрузки активной зоны ИБР-2 натриевый теплоноситель был слит из контуров охлаждения, натриевые контуры заполнены аргоном, демонтировано оборудование системы управления и защиты с отработавшим сроком службы. Подвижный отражатель отодвинут от корпуса в промежуточное положение. Корпус реактора демонтирован и удален в хранилище отработавших корпусов. Следующим этапом демонтажа оборудования

стало удаление откатных биологических защит со стационарными отражателями. Для выполнения этой задачи были реализованы технические и организационные меры по защите персонала от воздействия ионизирующего излучения в связи с высокой наведенной активностью стационарных отражателей. Особенностью конструкции новых откатных защит является создание откатных замедлителей, устанавливаемых в массив каждой защиты и передвигающихся по рельсовому пути вдоль продольной оси. Это позволяет производить оперативно смену замедлителей без демонтажа стационарных отражателей и рабочих органов системы управления и защиты. Заключительный этап модернизации был проведен в период 2010 — 2012 гг. Он включал в себя:

- физический пуск реактора ИБР-2М с водяными замедлителями,
- энергетический пуск реактора,
- монтаж комплекса криогенных замедлителей.

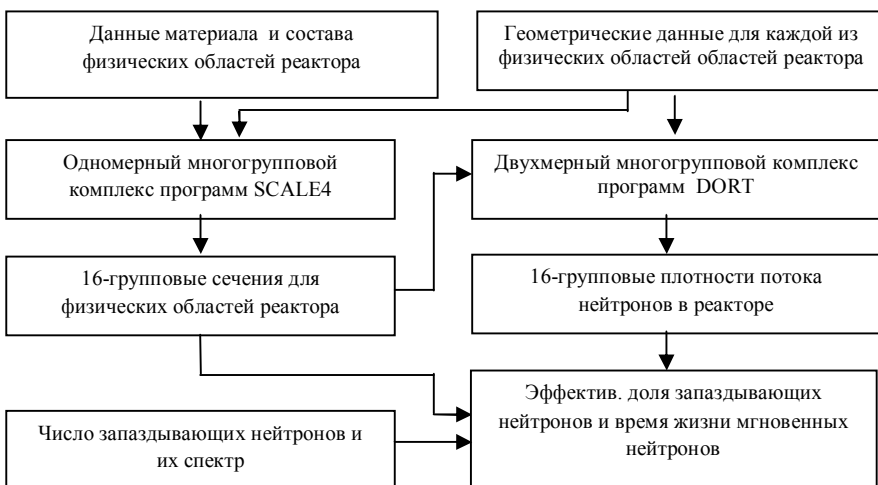
Таким образом, после 2011 г. в ОИЯИ снова начал работать модернизированный реактор ИБР-2 [1, 2].

В третьей главе приведены элементы теории и результаты расчета основных параметров кинетики ИБР-2М: эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{эф}$ и времени жизни мгновенных нейтронов τ . Для расчета использовались программа DORT [4] – двухмерный многогрупповой комплекс программ переноса нейтронов на базе метода дискретных ординат в S_n -приближении, и программа SCALE4 [5] с системой многогрупповых ядерных констант. В методе дискретных ординат угловое распределение потока нейтронов аппроксимируется функцией, определенной в дискретных узлах угловой переменной (S_n -приближение). С помощью программы SCALE4 были подготовлены 16-групповые сечения для двухмерных многогрупповых нейтронно-транспортных расчетов по программам DORT. Для учета анизотропии плотности потока нейтронов и сечения рассеяния использовалось транспортное P_1 -приближение. Тестовая проверка применения двухмерно-многогруппового комплекса программ переноса нейтронов DORT и одномерно-многогруппового комплекса программ SCALE4 с системой многогрупповых ядерных констант к расчету плотности потока нейтронов в реакторе ИБР-2М была проведена в более раннем исследовании [6]. Для выбора оптимальных расчетных оценок и повышения точности расчета $\beta_{эф}$ и

τ были проведены тестовые исследования. В качестве объекта тестовых расчетов были выбраны реактор ИБР-2 с известным экспериментальным значением τ и критическая сборка ZPR-III-59 с измеренным значением $\beta_{эф}$.

Все расчеты проведены в критическом состоянии. Это позволило выбрать оптимальную схему расчета, представленную в табл. 1.

Таблица 1. Схема расчета эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов ИБР-2М



Реактор ИБР-2 близок к ИБР-2М по типу и составу активной зоны. Сборка ZPR-III-59 близка к реактору ИБР-2М по составу и геометрическим размерам твэлов [7]. Сборка ZPR-III-59 является быстрой критической сборкой с плутониевым топливом, замедлителем из графита и отражателем из свинца. Загрузка топлива в активной зоне ZPR-III-59 ~80 кг близка к загрузке зоны реактора ИБР-2М. На рис. 1 показаны спектры нейтронов в активной зоне ZPR-III-59 и ИБР-2М. Расчетный спектр нейтронов в ИБР-2 практически совпадает со спектром в ИБР-2М. На рис. 1 видно, что графитовые замедлители сборки ZPR-III-59 не сильно смягчают спектр быстрых

нейтронов в активной зоне и, соответственно, условия расчета параметров кинетики в ZPR-III-59 будут близки к расчету ИБР-2М.

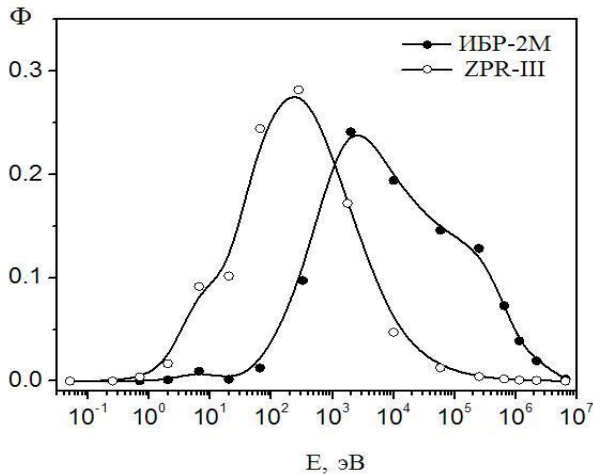


Рис. 1. Расчетный спектр нейтронов в активной зоне ИБР-2 и ZPR-III-59 в относительных единицах

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования стохастических флуктуаций энергии импульсов реактора ИБР-2М, по которым получены основные параметры кинетики реактора. Для модернизированного реактора ИБР-2М, также как и для ИБР-2, имеются две основные причины, вызывающие флуктуации энергии импульсов. Это стохастический характер процесса деления и размножения нейтронов и флуктуации внешней реактивности. Стохастический характер шумов доминирует в колебаниях мощности при малой интенсивности нейтронов. Колебания внешней реактивности вызывают флуктуации импульсов на любом уровне мощности. Флуктуации мощности отрицательно влияют на динамику реактора, процесс его регулирования, пуска, на работу экспериментальной аппаратуры и т.д. С другой стороны, наличие больших флуктуаций мощности в реакторе ИБР-2 имеет свои плюсы. Исследование флуктуаций на большом уровне мощности позволяет оценить источник возмущений внешней реактивности и диагностировать динамику его изменения, что напрямую связано с обеспечением безопасной работы реактора. Исследование стохастических флуктуаций позволяет оценить некоторые ядерно-

физические параметры активной зоны, такие как среднее время жизни мгновенных нейтронов, абсолютный уровень мощности и т.д. Задача экспериментального исследования стохастических шумов для оценки параметров кинетики ИБР-2 состоит в накоплении серии последовательных значений энергии импульсов на различных уровнях средней мощности. Энергия импульсов регистрировалась с помощью специально созданной для этой цели измерительной системы. В качестве детектора нейтронов использовалась камера КНК-53М, установленная вблизи активной зоны непосредственно у замедлителя со стороны первого горизонтального пучка нейтронов. После накопления 8192 последовательных значений энергии импульсов данные записывались в файл для дальнейшей обработки. Использовалась процедура статистического анализа временных рядов. Вычислялись плотность распределения энергии импульсов и параметры этого распределения. Флуктуации энергии импульсов исследовались в диапазоне средней мощности от 0,01 Вт до 1,5 кВт. В зависимости от средней мощности реактора в источнике нейтронов, «зажигающих» импульс мощности, могут доминировать спонтанные или запаздывающие нейтроны. Для реактора ИБР-2М оценки граничной мощности были получены с учетом импульсного коэффициента передачи, по которому можно определить практическую реализуемость эксперимента, а именно, как далеко от критического состояния на мгновенных нейтронах находится реактор при выбранной для эксперимента средней мощности. Определена граница мощностей для экспериментального изучения флуктуаций энергии импульсов в областях спонтанного и запаздывающего источников нейтронов:

$$\text{спонтанные:} \quad S \approx S_{\text{сп}} \quad \text{при} \quad W < 0,01 \text{ Вт};$$

$$\text{запаздывающие:} \quad S = S_3 = \beta_{3\phi} \cdot \nu \cdot F \quad \text{при} \quad W > 1 \text{ Вт}.$$

Наблюдаемые относительные флуктуации энергии импульсов в зависимости от мощности равны:

$$(\sigma_Q / \bar{Q})^2 = \delta_0^2 + M; \quad \text{—} \quad W < 0,01 \text{ Вт} \text{—} \text{ область спонтанных нейтронов; } (\sigma_Q / \bar{Q})^2 = \delta_0^2 + \frac{C}{W}; \quad C = \frac{\Gamma}{2\tau\beta_{3\phi}L} \quad \text{—} \quad W > 1 \text{ Вт} \text{—} \text{ область}$$

запаздывающих нейтронов. Значения M и $C = d(\sigma_Q / \bar{Q})^2 / d(1/W)_{1/W \rightarrow 0}$ — экспериментально определяемые величины. Расчетная и экспериментальная зависимости относительной дисперсии флуктуаций энергии импульсов $(\sigma_Q / \bar{Q})^2$ от обратной мощности W^{-1} приведены на рис. 2.

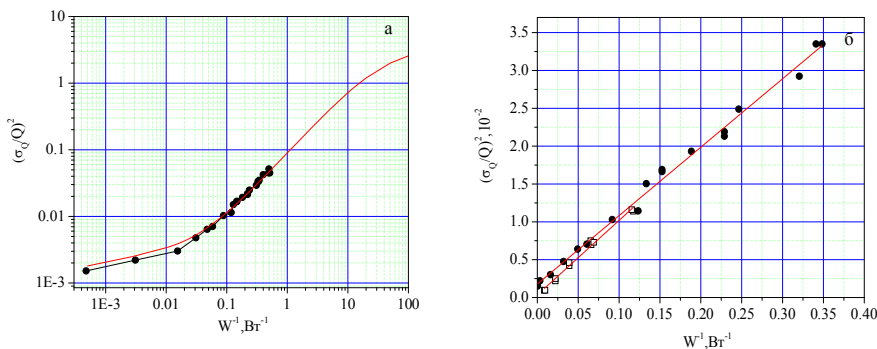


Рис. 2. Зависимость относительной дисперсии энергии импульсов реактора ИБР-2М (●) и ИБР-2 (◻) от обратной мощности W^{-1} [Вт⁻¹]. Сплошная линия на рис. 2, а — расчет, на рис. 2, б показана линейная аппроксимация данных

При мощности $1 \text{ Вт} \leq W \leq 20 \text{ Вт}$ относительную дисперсию можно аппроксимировать линейной зависимостью

$$(\sigma_Q / \bar{Q})^2 \approx \delta_0^2 + \frac{0,090 \pm 0,005}{W}, \quad (1)$$

где $\delta_0^2 \approx 2,49 \cdot 10^{-3}$; (см. рис. 2, б). Как видно из рис. 2, расчетная зависимость практически совпадает с измеренной. Незначительное расхождение в сторону увеличения экспериментального значения дисперсии связано с увеличением разброса импульсов за счет медленного изменения мощности в процессе измерений. Частично это было вызвано неточностью установки средней мощности и действиями оператора реактора, направленными на поддержание средней мощности в процессе измерений. На рис. 3 показана измеренная плотность распределения энергии импульсов на

некоторых уровнях средней мощности. Там же на рис. 3 приведена расчетная форма распределения, аппроксимирующая экспериментальные точки по свободному параметру средней мощности. Выше показано, что при средней мощности реактора $W > 1$ Вт относительную дисперсию флуктуаций энергии импульсов можно представить в виде $(\sigma_Q / \bar{Q})^2 = \delta_0^2 + \frac{C}{W}$, где

$$C = \frac{\Gamma}{2\tau\beta_{\text{эф}}L} = 0,090 \pm 0,005. \quad (2)$$

Здесь $\Gamma = 0,815 \pm 0,017$, $L = 3,21 \cdot 10^{10}$ [дел/с · Вт] — дисперсия числа мгновенных нейтронов при делении и число делений в секунду на 1Вт, $\delta_0^2 = 2,49 \cdot 10^{-3}$ - шумы от колебаний внешней реактивности. Из (2) получим значение комплекса $(\tau \cdot \beta_{\text{эф}}) = (1,41 \pm 0,2) \cdot 10^{-10}$ с. Если зафиксировать расчетное значение эффективной доли запаздывающих нейтронов равным $\beta_{\text{эф}} = 0,002165 \pm 0,00007$, поскольку в данном случае расчетная величина $\beta_{\text{эф}}$ для ИБР-2М совпадает с измеренной для ИБР-2, т.е. достаточно надежна, то получим $\tau = (6,53 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ с.

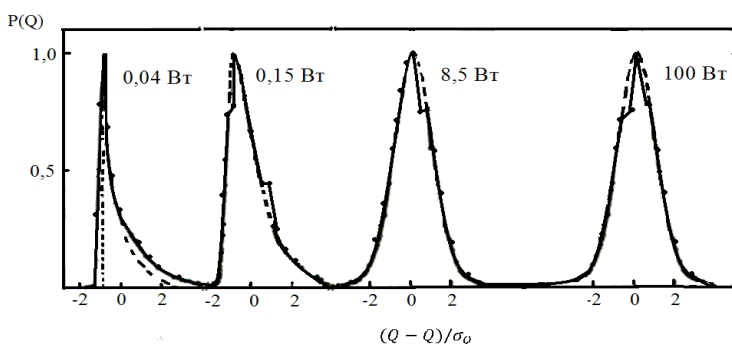


Рис. 3. Нормированная плотность распределения энергии импульсов модернизированного реактора ИБР-2 на некоторых уровнях средней мощности

Расчетное значение τ равно $(6,50 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$ с. Исследование флуктуаций энергии импульсов ИБР-2 позволяет определить также абсолютную мощность реактора. На мощности 1-100 Вт флуктуации энергии импульсов обратно пропорциональны значению скорости делений в реакторе:

$$(\sigma_Q / \bar{Q}^2) = \delta_0^2 + \frac{\Gamma}{2\tau\beta_{эф}F} \quad (3)$$

Для F можно записать $W[\text{Вт}] = aN = \frac{F}{L}$, где a — коэффициент перевода показаний детектора в мощность, N — скорость счета или амплитуда импульса тока камеры. Тогда

$$(\sigma_Q / \bar{Q}^2) = \delta_0^2 + \frac{P}{N} \quad (4)$$

$P = \frac{\Gamma}{2a\beta_{эф}L\tau}$, $W[\text{Вт}] = \frac{\Gamma}{2\beta_{эф}\tau PL}N$. Все параметры в последнем выражении определены выше. Линейная аппроксимация зависимости (4) от $(1/N)$ имеет вид

$$(\sigma_Q / \bar{Q}^2) = 1,7 \cdot 10^{-3} + \frac{0,029 \pm 0,009}{N} \quad (5)$$

Отсюда связь абсолютной мощности реактора с показаниями штатных измерительных каналов (N) следующая: $W[\text{Вт}] = (3,11 \pm 0,22) \cdot N$, что в пределах ошибки совпадает с оценкой средней мощности, определенной по тепловыделению в активной зоне $W[\text{Вт}] = (3,0 \pm 0,15) \cdot N$. Для дополнительной оценки калибровки мощности использованы также данные по плотности распределения энергии импульсов реактора ИБР-2. Результаты такой калибровки практически совпадают с данными калибровки с использованием выражения (5). При использовании экспериментального значения $S_{сн} = (5,3 \pm 0,20) \cdot 10^6$ н/см²с, полученного при загрузке активной зоны, определена граничная мощность ($W < 0,01$ Вт), ниже которой в

источнике нейтронов преобладают спонтанные нейтроны. Относительную дисперсию флуктуаций энергии импульсов на границе этой области можно представить в виде $(\sigma_Q / \bar{Q})^2 = \delta_0^2 + (2,99 \pm 0,09)$ и $M = \frac{\nu \cdot \Gamma}{2\tau S_{\text{сп}}} = 2,99 \pm 0,09$. Отсюда

мощность источника спонтанных нейтронов

$$S_{\text{сп}} \leq \frac{\nu \cdot \Gamma}{2\tau \cdot 2,99} \leq (6,72 \pm 0,12) \cdot 10^6 \text{ нейтр./с.} \quad (6)$$

Расчетное значение составляет $(7,1 \pm 0,16) \cdot 10^6$ нейтр./с. Таким образом, оценка источника нейтронов по стохастическим шумам мощности достаточно близка к расчетной.

В заключительной части диссертации приведены общие выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены впервые и сводятся к следующему.

1. Рассчитаны основные параметры кинетики реактора ИБР-2М: эффективной доли запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{эф}}$ и времени жизни мгновенных нейтронов τ . Расчет основывался на использовании двумерной многогрупповой программы переноса нейтронов и программ SCALE4 с системой многогрупповых ядерных констант. Расчетные значения кинетических параметров ИБР-2М в штатном режиме его работы следующие: $\beta_{\text{эф}} = 0,002165 \pm 0,000007$, $\tau = 6,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}^1$. Величины $\beta_{\text{эф}}$ и τ на $\sim 0,2\%$ и $\sim 5,0\%$ больше, чем для ИБР-2 ($\beta_{\text{эф}} = 0,002160$ и $\tau = (6,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8} \text{ с}$).
2. С помощью программы SCALE4 были подготовлены 16-групповые сечения для двумерных многогрупповых нейтронно-транспортных расчетов по программам DORT.
3. Из анализа расчетных данных по параметрам кинетики выявлено, что отличие в использовании S_8 - от S_{16} -приближения при оценке времени жизни мгновенных нейтронов в ZPR-III-59 составляет \sim

4,9%, для ИБР-2 – ~ 4,5%. Показано, что величина $\beta_{эф}$ слабо меняется от номера приближения и для расчета эффективной доли запаздывающих нейтронов достаточно использовать приближение S_8 . Для оценки времени жизни необходимо использовать его асимптотическое с увеличением номера приближения значение. Это значение практически реализуется в S_{16} -приближении $\tau = 6,17 \cdot 10^{-8}$ с. Расчетное асимптотическое значение τ для ИБР-2 близко к измеренному $\tau = (6,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ с. Отсюда было принято все расчеты по τ для ИБР-2М проводить в S_{16} -приближении.

4. В случае использования ν_d из работы Tuttle [8] получается значение $\beta_{эф}$, наиболее близкое к экспериментальному значению как для ZPR-III-59, так и для ИБР-2. Расчетное значение $\beta_{эф}$, равное 0,00239 для ZPR-III-59, отличается от измеренного $0,00233 \pm 0,0001$ на +2,6%. Для ИБР-2 расчетное значение $\beta_{эф} = 0,002160$ практически совпадает с экспериментальным. Из анализа расчетных данных можно сказать, что погрешность расчетной оценки $\beta_{эф}$ для ИБР-2М будет не более $\pm 3\%$.
5. Анализ тестовых расчетов для сборки ZPR-III-59 и реактора ИБР-2, близких по составу и геометрии к ИБР-2М, показал, что наблюдается некоторое увеличение $\beta_{эф}$ и τ при уменьшении размеров активной зоны в радиальном направлении.
6. Исследованы стохастические флуктуации энергии импульсов модернизированного реактора ИБР-2 в диапазоне средней мощности от 0,01 до 1,5 кВт. Экспериментальные результаты по стохастическим шумам мощности позволили оценить основные ядерно-физические параметры активной зоны, такие как среднее время жизни мгновенных нейтронов $\tau = (6,53 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ с, абсолютную мощность реактора и интенсивность источник спонтанных нейтронов $S_{сн} \leq (6,72 \pm 0,12) \cdot 10^6$ нейтр./с.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В. и др.* Физический пуск модернизированного реактора ИБР-2. Препринт ОИЯИ Р13-2012-41. Дубна, 2012.
2. *Ананьев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В. и др.* Энергетический пуск модернизированного реактора ИБР-2. Препринт ОИЯИ Р13-2012-42. Дубна, 2012.
3. *Ананаев В.Д., Виноградов А.В., Долгих А.В.* Реактор ИБР-2 — эксплуатация и перспективы развития / В сб.: 11-е ежегодное рос. сов. по безопасности исследовательских ядерных установок. Димитровград, 2009, с. 69-77.
4. *Johnson J.O.* DORT: A two-dimensional discrete ordinates transport code / ORNL / TM -11778. ORNL, 1992.
5. *Greene N., Petrie L.* SCALE: A Modular code system for performing standardized computer analyses for licensing evaluation / NUREG/CR-0200 (ORNL/NUREG/CSD-2/R6),v. I-III, 2000.
6. *Чжан Чан Мин.* Влияние термомеханических перемещений реакторных конструкций на реактивность ИБР-2М. Сообщение ОИЯИ Р13-2009-166. Дубна, 2009.
7. *Carpenter S., Gasidlo J., Stevenson J.* Measurements of the of the effective delayed-neutron fraction in two fast critical experiments // Nucl. Sci. Eng. 1972, v. 49, pp. 236-239.
8. *McKnight R.* Delayed neutron data for the major actinides / A report by the working party, on international evaluation co-operation of the NEA nuclear science committee. NEA/WPEC-6, OECD, 2002.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Мехтиева Р.Н., Пепельшев Ю.Н, Рогов А.Д., Тайыбов Л.А., Чжан Чан Мин.* Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов в реакторе ИБР-2М. Препринт ОИЯИ Р13-2010-89. Дубна, 2010.

2. *Пепельшев Ю.Н., Рогов А.Д., Тайыбов Л.А., Чжан Чан Мин, Мехтиева Р.Н.* Расчет эффективной доли запаздывающих нейтронов и времени жизни мгновенных нейтронов в ИБР-2М // Атомная энергия. 2011, т. 111, № 2, с. 88-92.
3. *Мехтиева Р.Н., Пепельшев Ю.Н., Тайыбов Л.А., Чжан Чан Мин.* Тестовые исследования по влиянию используемых приближений на расчетные величины $\beta_{эф}$ и τ в реакторе ИБР-2М / Труды международной конференции «Перспективы использования ядерной энергии в мирных целях», Баку, Азербайджан, 8-10 ноября 2010 г, с.45-46.
4. *Мехтиева Р.Н., Пепельшев Ю.Н., Тайыбов Л.А., Чжан Чан Мин.* Тестовые исследования по выбору данных по ν_d для расчета $\beta_{эф}$ и τ в реакторе ИБР-2М / Труды международной конференции «Перспективы использования ядерной энергии в мирных целях», Баку, Азербайджан, 8-10 ноября 2010 г, с. 47-48.
5. *Пепельшев Ю.Н., Тайыбов Л.А., Гарибов А.А., Мехтиева Р.Н.* Экспериментальная оценка параметров кинетики реактора ИБР-2М по стохастическим шумам мощности. Препринт ОИЯИ Р13-2012-16. Дубна, 2012.
6. *Пепельшев Ю.Н., Тайыбов Л.А., Гарибов А.А., Мехтиева Р.Н.* Экспериментальная оценка параметров кинетики ИБР-2М по стохастическим шумам мощности // Атомная энергия. 2012, т.114, № 4, с. 202-205.
7. *Гарибов А.А., Пепельшев Ю.Н., Мехтиева Р.Н., Тайыбов Л.А.* Стохастические флуктуации энергии импульсов модернизированного реактора ИБР-2// АМЕА Хəбərləri, fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, 2012, cild XXXII, № 5, s.39-44.
8. *Тайыбов Л.А., Мехтиева Р.Н.* Распределение энергии импульсов модернизированного реактора ИБР-2 / Труды международной конференции «Перспективы использования ядерной энергии в мирных целях», Баку, Азербайджан, 23-25 ноября 2011 г, с. 55.
9. *Mehdiyeva R.N., Tayıbov L.Ə.* ZPR-3-59 reaktoru üçün gecikən neytronların effektiv payının və ani neytronların yaşama müddətinin hesablanması // АМЕА Хəбərləri, fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, 2010, cild XXX, № 5, s. 139-142.

10. *Garibov A.A., Mechtiyeva R.N., Tayibov L.A.* Measurement of the pulse shape and pulse energy distribution at the IBR-2M reactor // Azerbaijan Journal of Physics, 2012, v. XVIII, No. 3, section: En., pp. 50-53.
11. *Tayibov L.A.* Estimation prompt neutrons lifetime from the power pulse shape at the IBR-2M reactor / Proceedings International Conference «Nuclear science and its application», Institute of Nuclear Physics, Samarkand, Uzbekistan, 25-28 September, 2012, pp.311-312.
12. *Pepelyshev Yu.N., Tayibov L.A., Vinogradov A.V.* Experimental Estimation of the IBR-2M Reactor Kinetic Parameters from Stochastic Power Noise //Proceedings International Meeting «Reactor Noise Knowledge Transfer for Research and Test Reactors», Prague, Czech Republic, 14-21October, 2012.

**MODERNİZƏ OLUNMUŞ İBR-2 REAKTORUNUN KİNETİK
PARAMETRLƏRİNİN HESABLANMASI VƏ
TƏCRÜBİ TƏDQIQI**

XÜLASƏ

Modernizə olunmuş İBR-2 reaktorunun əsas kinetik parametrləri olan gecikən neytronların effektiv payı β_{eff} və ani neytronların yaşama müddəti τ hesablanmışdır. Hesablama iki-ölçülü çox enerji qruplu DORT və birölçülü çox qruplu nüvə sabitlərini tapmağa imkan verən SCALE4 proqramları vasitəsilə aparılmışdır. Reaktorun kritik halında gecikən neytronların effektiv payı, ani neytronların yaşama müddəti, gecikən neytronların effektivliyi və ani neytronlar sabiti üçün $\beta_{eff} = 0.002165 \pm 0.00007$, $\tau = 6.5 \times 10^{-8}$ s qiymətləri alınmışdır. β_{eff} və τ üçün alınmış qiymətlər İBR-2 reaktorunun uyğun parametrlərindən ($\beta_{eff} = 0.002160$ və $\tau = (6.2 \pm 0.2) \times 10^{-8}$ s) $\sim 0.2\%$ və $\sim 5.0\%$ böyükdür. Göstərilmişdir ki, radial istiqamətdə aktiv zonanın ölçülərinin kiçilməsi gecikən neytronların effektiv payı β_{eff} və ani neytronların yaşama müddətinin τ artması ilə müşahidə olunur.

Həmçinin modernizə olunmuş İBR-2 reaktorunun kinetik parametrlərini təcrübi təyin etməyə imkan verən enerji impluslarının stoxastik fluktuasiyası tədqiq olunmuşdur. Reaktorun orta gücünün müxtəlif qiymətlərində enerji impluslarının paylanmasına əsasən ədədi qiymətlər ardıcılığı qeydə alınmışdır. Qeydedici kimi, borla doldurulmuş ionlaşma kamerasından istifadə olunmuşdur. Tədqiqatın nəticəsinə əsasən ani neytronların yaşama müddəti $\tau = (6,53 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ s reaktorun gücü və spontan neytron mənbəyinin intensivliyi $S_{sp} \leq (6,72 \pm 0,12) \cdot 10^6$ n/s təcrübi təyin olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, təcrübi nəticələr hesablamadan alınan nəticələrə çox yaxındır.

**CALCULATED AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION
KINETIC PARAMETERS OF THE MODERNIZED IBR-2
REACTOR**

SUMMARY

Calculation of main kinetic parameters for the reactor IBR-2M is carried out: the effective delayed neutron fraction and the prompt neutron lifetime. The calculation is based on the use of DORT, a two-dimensional multi-group program for resolving of neutron transport equation, and one-dimensional SCALE4 programs for generating multi-group nuclear cross-sections. Calculation values of kinetic parameters for IBR-2M in a regular mode of its work are obtained: $\beta_{eff} = 0.002165 \pm 0.00007$, $\tau = 6.5 \times 10^{-8}$ s. The parameters β_{eff} and τ are $\sim 0.2\%$ and $\sim 5.0\%$ greater than for IBR-2 ($\beta_{eff} = 0.002160$ and $\tau = (6.2 \pm 0.2) \times 10^{-8}$ s). It is shown that β_{eff} and τ increase with reduction of the size of the active zone.

Experimental investigations of stochastic fluctuations of pulse energy of the IBR-2M reactor have been carried out which allowed to receive some of the parameters of the reactor kinetics. At different levels of average power a sequence of values of pulse energy was recorded with the calculation of the distribution parameters. An ionization chamber with boron installed near the active zone was used as a neutron detector. The research results allowed us to estimate the average lifetime of prompt neutrons $\tau = (6,53 \pm 0,2) \cdot 10^{-8}$ s, absolute power of the reactor and intensity of the source of spontaneous neutrons $S_{sp} \leq (6,72 \pm 0,12) \cdot 10^6$ n/s. It was shown that the experimental results are close to the calculated ones.

Əlyazması hüququnda

LAÇIN ƏNVƏR OĞLU TAYİBOV

**MODERNİZƏ OLUNMUŞ İBR-2 REAKTORUNUN KİNETİK
PARAMETRLƏRİNİN HESABLANMASI VƏ TƏCRÜBİ
TƏDQIQI**

2207.01 – Atom və nüvə fizikası

2225.01 – Radiasiya materialşünaslığı

fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim olunmuş dissertasiyanın

A V T O R E F E R A T I