

B-176

На правах рукописи

ВАНЬКОВ АНАТОЛИИ АНДРЕЕВИЧ

**Экспериментальное изучение резонансной структуры
нейтронных сечений $U-235$, $U-238$, $Pu-239$
с ядерно-физическими приложениями
для быстрых реакторов**

(Специальность 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц)

*Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук*

Дубна — 1980

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени Физико-энергетическом институте и лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор К. А. Петржак,
доктор физико-математических наук, профессор Г. И. Смиренкин,
доктор физико-математических наук, профессор В. П. Вертебный.

Ведущее предприятие — Институт атомной энергии имени И. В. Курчатова.

Защита состоится «*6. декабря*» 198*0* года в *15³⁰* час.
на заседании специализированного совета Д.047.01.05 при лаборатории нейтронной физики и лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «*19. декабря*» 1980 года.

Ученый секретарь
специализированного совета

Ю. В. ТАРАН.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации содержатся результаты исследований автора в области нейтронной физики. Большая часть диссертационной работы была выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (г. Дубна) в рамках совместных научно-исследовательских работ ОИЯИ и Физико-энергетического института под эгидой ГК ИАЭ. Работа обеспечивалась за счет тематики быстрых реакторов. Поэтому цель диктовалась потребностями (со стороны проектировщиков быстрых реакторов) в обеспечении ядерными данными, среди которых нейтронные данные сырьевых и топливных материалов имеют первостепенное значение. Вторая часть диссертации отвечает именно этой цели — использованию новой экспериментальной информации о нейтронных данных для решения константной проблемы, в первую очередь, воспроизводства ядерного горючего.

Таким образом, диссертация посвящена экспериментальному изучению нейтронных сечений и их резонансной структуры для изотопов $U-235$, $U-238$, $Pu-239$ и отражает два аспекта: получение и анализ новой экспериментальной информации для: а) физики атомного ядра; б) физики быстрых реакторов.

Актуальность проблемы. Для тяжелых ядер в области неразрешенных резонансов практически отсутствует прямая экспериментальная информация о характеристиках резонансной структуры нейтронных сечений. Под этими характеристиками понимается совокупность следующих величин: средние резонансные параметры, функция распределения (плотность вероятности) полного сечения и функция корреляции полного и частичных сечений, так называемые моменты сечений, подгрупповые параметры, факторы резонансного самоэкранирования и некоторые другие функционалы. Теоретическое предсказание подобных характеристик составляет первый (ядерно-физический) аспект рассматриваемой проблемы. В основе этого предсказания лежит использование какой-либо ядерно-физической модели нейтронных сечений со средними резонансными параметрами, полученными в разрешенной области. Суть задачи заключается в экстраполяции данных из разрешенной области в область неразрешенную и в оценке надежности такой экстраполяции (с учетом экспериментальных данных

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

по средним сечениям). Возникающие здесь трудности известны. Погрешность средних резонансных параметров обусловлена бедностью статистики уровней и их пропуском, а также общей трудностью идентификации состояний по спину и четности. Особенно это проявляется для делящихся ядер типа $U-235$ и $Pu-239$, для которых количество серий уровней, отличающихся значениями квантовых чисел, велико даже при низких энергиях. Трудность идентификации для $U-235$ усугубляется вследствие малого относительного различия J для S -резонансов. Плохое знание распределения делительных ширин (числа степеней свободы) также является следствием недостатка информации, касающейся параметров разрешенных резонансов. Особо следует отметить непригодность одноуровневого формализма для анализа резонансов делящихся ядер. Многоуровневый же формализм оперирует более абстрактными параметрами, не имеющими наглядного физического смысла и допускающими значительную вариацию (неоднозначность) в подгонке теории к эксперименту, в зависимости от варианта формализма и схемы подгонки. Наконец, имеется проблема включения в теоретическую модель так называемой промежуточной структуры. Но даже для неделящихся четно-четных ядер проблему теоретического описания резонансной структуры нейтронных сечений нельзя считать решенной. В частности, одним из вопросов является правомерность распространения брейт-вигнеровского формализма (со средними резонансными параметрами, полученными из разрешенной области) на область неразрешенных резонансов.

Второй (реакторно-физический) аспект наших исследований заключается в практической важности информации о резонансной структуре нейтронных сечений для физики быстрых реакторов. Хотя энергетический спектр нейтронов в быстром реакторе достаточно жесткий (средняя энергия ~ 200 кэВ), медианная энергия процесса захвата нейтронов оказывается гораздо меньшей: ~ 15 кэВ для $Pu-239$, ~ 45 кэВ для $U-238$. За счет резонансного самоэкранирования скорость наработки плутония снижается примерно на 25%. Это и неудивительно. Сечение поглощения нейтронов ядрами $U-238$, усредненное по спектру нейтронов активной зоны типичного быстрого реактора-размножителя, равно, примерно, 0,4 бн, однако резонансное самоэкранирование снижает эту величину до уровня 0,3 бн. Таким образом, средний фактор резонансного самоэкранирования получается равным $f_c \approx 0,75$, при-

чем основной вклад дает область неразрешенных резонансов. Практически весь доплеровский коэффициент в быстром реакторе обусловлен неразрешенной областью энергий. Если допустить погрешность $f_c \pm 10\%$ (что отвечает реальным оценкам), то это приводит к следующим погрешностям параметров быстрого реактора: в коэффициенте критичности $\sim 2,5\%$, в полном коэффициенте воспроизводства и коэффициенте воспроизводства активной зоны $4 \pm 10\%$, в зависимости от стратегии оценки. Уже одна только эта компонента погрешности превышает допустимый уровень, требуемый реакторщиками исходя из экономических критериев. Меньший, но также заметный вклад в погрешность дают факторы резонансного самоэкранирования сечений захвата и деления делящихся изотопов.

Цель работы. Целью экспериментального изучения резонансной структуры нейтронных сечений в неразрешенной области является определение средних характеристик резонансной структуры (средние резонансные параметры, функции распределения сечений, моменты сечений, в том числе средние значения, подгрупповые параметры, факторы резонансного самоэкранирования) с тем, чтобы а) сравнить экспериментально найденные величины с соответствующими расчетно-теоретическими оценками, б) уточнить ядерно-физические константы основных топливно-сырьевых материалов в области неразрешенных резонансов с последующей переоценкой расчетных значений основных физических характеристик ядерного реактора-размножителя. Основным методом экспериментальных исследований является метод пропускания и самоиндикации в сочетании с техникой нейтронной спектрометрии.

Научная новизна. В литературе имеются лишь отрывочные экспериментальные данные по функциям пропускания и самоиндикации для $U-235$, $U-238$, $Pu-239$ в неразрешенной области, причем они получены лишь для области малых толщин. Так, единственная работа (Кзир и Брамлет) посвящена измерению самоиндикации деления $U-235$ и $Pu-239$. Измерений функций пропускания всеволновым детектором при этом не делалось, поэтому оценка факторов резонансного самоэкранирования сечений деления по этим данным не возможна. Для $U-238$ имеется лишь два противоречащих друг другу эксперимента, где измерялись функции про-

пускания и самоиндикации захвата. Наши измерения функций пропускания в сферической геометрии являются единственными. Практически неисследована в прямых экспериментах температурная зависимость резонансной структуры нейтронных сечений. Таким образом, полученная нами экспериментальная информация о средних характеристиках резонансной структуры нейтронных сечений тяжелых ядер в неразрешенной области является новой.

Научная и практическая ценность работы. Научная ценность работы состоит в проверке и уточнении расчетно-теоретических моделей, описывающих резонансную структуру нейтронных сечений, в ответе на вопрос - насколько правомерно распространение описания сечений из разрешенной в неразрешенную область.

Практическое значение определяется использованием полученных экспериментальных данных для уточнения ядерно-физических характеристик (параметров критичности и воспроизводства, доплеровского коэффициента и др.).

Положения и результаты, вынесенные на защиту, с указанием личного вклада автора и краткой характеристики.

Совокупность полученных результатов относится к разделу научных исследований, которые в целом можно охарактеризовать как новое перспективное направление на стыке нейтронной физики и физики реакторов: экспериментальное изучение резонансной структуры полных и парциальных нейтронных сечений в области неразрешенных и плохо разрешенных резонансов с применением методов нейтронной спектроскопии, пропускания и самоиндикации.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

I. Разработка общего метода исследования неразрешенной резонансной структуры нейтронных сечений и совокупности экспериментальных методик с целью получения новой ядерно-физической информации. Распространения этих методик на прикладные задачи.

II. Результаты ядерно-физических исследований

- средние резонансные параметры, средние полные сечения и сечения поглощения и их факторы резонансного самоэкранирования, доплеровские коэффициенты в полном сечении для U-238, E < 100 кэВ;

- средние полные сечения, факторы резонансного самоэкранирования полных сечений и сечений деления для U-235 и ρ_{0-239} ,

E < 20 кэВ;

- функции распределения сечений, моменты сечений и подгрупповые параметры указанных трех изотопов;

- величины $\sqrt{\sigma_{эф}}$, α , β_f для U-235 и ρ_{0-239} при энергии 24 кэВ;

- рекомендации для переоценок ядерных констант на основе полученных результатов.

III. Результаты исследований в области методологии эксперимента

- тезис и его обоснование о необходимости отказа от непосредственных в смысле статистической теории методов обработки в пользу байесовского подхода; развитие метода статистической регуляризации, разработка и демонстрация единого алгоритма обработки и "переноса" информации;

- методика составления ковариационных матриц (микроскопические и интегральные эксперименты), демонстрация практической важности корреляционных связей в экспериментальных данных;

- положение о зависимости результатов предсказания физических характеристик быстрых реакторов (q-оценок) от общей стратегии их развития;

- формулировка оптимизационной задачи в условиях неопределенности, идея нового метода.

IV. Результаты расчетно-теоретических оценок некоторых новых малых эффектов, связанных с переносом резонансных нейтронов в средах. Предложения соответствующих перспективных экспериментов.

- эффект реактивности реактора за счет поляризации быстрых нейтронов в спин-орбитальном взаимодействии при рассеянии в отражателе;

- теоретическое положение о существовании эффекта квантонеупругого рассеяния резонансных нейтронов при образовании смещенных атомов урана;

- эффект резонансного самоэкранирования в величине "альфа".

V. Результаты анализа нейтронных данных с целью уточне-

ния реакторно-физических параметров и выдачи рекомендаций.

- оценка погрешности реакторного расчета за счет ядерных данных и за счет приближений подготовки констант;

- уточнение параметров критичности и воспроизводства с учетом интегральных данных, рекомендации к физической проработке реактора типа БН-1500. Решение константной проблемы воспроизводства на стадии перехода (1971-77гг.) к новой системе констант (вывод об уменьшении КВ и КВА на 0,06-0,08, в зависимости от композиции, для реактора типа БН-1500).

Комментарии относительно личного вклада автора, научного и практического значения и новизны конкретных положений и результатов, вынесенных на защиту.

По пункту I положений, вынесенных на защиту, личный вклад автора заключается в участии в разработке общего направления экспериментальных исследований, программы экспериментов, в постановке задач на разных этапах, разработке экспериментальных методик и их реализации. Новизна заключается в применении метода пропускания и самоиндикации для получения новой информации о резонансной структуре полных и парциальных нейтронных сечений, разработке специальной техники и аппаратуры, отвечающей широкой программе экспериментов, в методических новшествах, направленных на достижение высокой точности, в применении для реакторной физики. Методики имеют практическое значение - с точки зрения нового опыта ядерно-физических исследований и прикладных задач.

По пункту II личный вклад автора заключается в участии в получении результатов на всех этапах и в научном руководстве работой в целом. Совокупная информация в области неразрешенных и плохо разрешенных резонансов по нейтронным сечениям, их средним резонансным характеристикам и функциям распределения для указанных изотопов получена впервые и не имеет аналога в литературе. Результаты по полным средним сечениям являются прецизионными. Абсолютные результаты по эффективному сечению поглощения для U-238 в экспериментах в обратной сферической геометрии получены впервые. Рекомендация по уменьшению оценок сечения $\sigma_c(U-238)$ и его факторов резонансного самоэкранирования в неразрешенной области была первой. Результаты представляют интерес для ядерной теории и имеют практическое значение для физики и проектирования быстрых реакторов.

По пункту III автору принадлежат постановка задач и основные результаты ее исследования. Результаты относятся к области методологии эксперимента и являются оригинальными. Имеют как теоретическое значение (особенно в проблеме надежности научного вывода), так и практическое значение - для задач обработки, анализа и оценки экспериментальной информации и ее использования в конкретных задачах, а также для задач оптимизации и планирования.

По пункту IV вклад автора состоит в участии в расчетах и пробных измерениях зависимости альbedo от поляризации быстрых нейтронов; в теоретическом предсказании нового эффекта квазиупругого рассеяния резонансных нейтронов, сопутствующего смещению атомов в решетке (на примере урана); в предложениях новых экспериментов по оценке этих эффектов, а также в предложении усовершенствованного метода измерения резонансного самоэкранирования величины "альфа". Изучение перечисленных физических явлений, связанных с распространением резонансных нейтронов в средах, имеет как теоретическое, так и прикладное значение.

По пункту V личный вклад автора состоит в постановке задач и в участии в получении результатов на всех этапах. Положения и результаты, содержащиеся в этом пункте, характеризуются следующей научной новизной и практическим значением. Впервые сформулирована и реализована задача оценки константной погрешности реакторных величин, рассчитываемых на основе действующей системы групповых констант, с учетом особенностей ее создания и положенных в основу данных, а также с учетом подготовки групповых констант и с учетом их подгонки под интегральные эксперименты. Эта работа была завершена всесторонним исследованием константной проблемы, остро стоявшей в середине 70-х годов в СССР, в части предсказания критичности и воспроизводства большого быстрого реактора. Результатом этого исследования явились обоснованные и своевременные рекомендации по уточнению и корректировке, в сторону уменьшения, расчетных критических масс плутония (в зависимости от его изотопного состава) и коэффициентов воспроизводства (глобальных и зонных) с указанием доверительных ин-

тервалов.

В диссертации отражен вклад участников совместных работ, а также опубликованные результаты работ других авторов, в которых затрагиваются вопросы темы диссертации.

Объем работы. Диссертация изложена на 333 страницах, включая 40 рисунков и 60 таблиц (220 страниц текста). Список литературы содержит 118 ссылок, из них 66 ссылок - авторские работы.

II. СТРУКТУРА И КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация представлена в двух частях:

Часть I. Разработка экспериментальных методик и измерения нейтронных сечений и средних резонансных характеристик для $U-235$, $U-238$, $Pu-239$.

Часть 2. Анализ нейтронных данных с целью уточнения основных физических характеристик большого быстрого реактора.

Первая часть состоит из шести глав и содержит материалы, касающиеся эксперимента. В первой главе показывается практическое значение измеряемых величин на примерах параметров активной зоны и зоны воспроизводства. Обоснование экспериментов делается на основе анализа ситуации с ядерными данными в начале 70-х годов, а также на современном этапе. Был сделан вывод о неудовлетворительной точности рассматриваемой группы ядерных данных, о необходимости и возможности их измерений.

Во второй главе описаны оригинальные методы измерений и обработки функций пропускания и других величин с целью извлечения полной информации (проблемы статистического анализа и интерпретации физического эксперимента рассмотрены с более общих позиций во 2-ой части диссертации, посвященной расчетным приложениям). В этой же главе описана перспектива дальнейших экспериментальных исследований резонансной структуры нейтронных сечений.

Третья глава содержит описание экспериментальных установок, в первую очередь на нейтронном спектрометре по време-

ни пролёта на быстром реакторе (ИБР), г.Дубна. Результаты экспериментов представлены в четвертой и пятой главах. Функции пропускания измерялись в диапазоне энергий нейтронов $E < 100$ кэВ, полные средние сечения - в более широком диапазоне. Для $U-238$ измерения функций пропускания проводились с использованием 3He -детектора при трех температурах образцов: комнатной, $\sim 1000^\circ K$ и температуре жидкого азота, при ослаблениях нейтронного пучка в пределах 4 порядков. Другая серия измерений проводилась с использованием жидкостного сцинтилляционного детектора (эксперименты по самоиндикации).

Для делящихся изотопов $U-235$ и $Pu-239$ проводились аналогичные измерения с 3He -детектором и камерами деления, при ослаблениях в пределах 1-2 порядков. Достаточно подробно описываются условия основных и контрольных измерений. Приведены результаты по полным сечениям и факторам резонансной самоэкранировки полных и парциальных сечений для трех указанных изотопов.

В диссертации содержатся также результаты измерений пропусканий в сферической геометрии с целью определения абсолютных сечений поглощения. Измерения проводились на спектрометре ИБР и в экспериментах с фотонейтронными $S\beta$ -Be-источниками с $U-238$ и делящимися изотопами.

Пример некоторых результатов, касающихся ядерных констант $U-238$, дан в табл. I, 2. Сравнение данных эксперимента и оценок показывает согласие в разрешенной области и систематическое расхождение в области неразрешенных резонансов. Похожая ситуация наблюдается и для делящихся изотопов.

Основной итог экспериментов с делящимися изотопами заключается в том, что впервые были получены в области неразрешенных резонансов экспериментальные оценки факторов резонансного самоэкранирования полного сечения и сечения деления. Экспериментальные результаты показали необходимость существенной корректировки расчетных оценок $f_c(U-235)$ (понижения оценки) и $f_c(Pu-239)$ (повышения оценки, см. рис. I, 2). При переходе в область разрешенных резонансов экспериментальные и расчетные оценки сближаются. Самостоятельный интерес представляют результаты обработки эксперимента с целью восстано-

Таблица I

Сравнение данных эксперимента и оценок по полному сечению и факторам резонансного самоэкранирования для U-238.

№ гр.	E, кэВ	$\langle \sigma_t \rangle$, бн			$f_t(\sigma_0=10) \times 100$		$\frac{\Delta f_t(\sigma_0=10)}{\Delta T^0} \frac{10^{-6}}{^{\circ}\text{K}}$	
		БНАБ-70	БНАБ-78	Экспер.	БНАБ-70	Экспер.	БНАБ-70	Экспер.
9	46,5-100	12,9	12,6	13,0 \pm 0,5	95,4	92 \pm 3	30	23 \pm 8
10	21,5-46,5	13,7	13,5	14,6 \pm 0,5	91,5	89 \pm 3	51	34 \pm 7
11	10 - 21,5	14,7	14,5	16,5 \pm 0,6	84,6	77 \pm 3	71	67 \pm 10
12	4,65 - 10	16,1	15,9	17,3 \pm 0,8	74,9	69 \pm 4	78	47 \pm 8
13	2,15 - 4,65	18,2	19,0	20,0 \pm 1,0	63,4	61 \pm 5	64	65 \pm 15
14	1 - 2,15	21,6	22,2	22,2 \pm 1,0	51,2	46 \pm 6	48	54 \pm 12
15	0,465 - 1	22,4	23,7	24,0 \pm 1,0	46,9	44 \pm 5	33	33 \pm 7

Таблица 2

Сравнение данных эксперимента и оценок по сечению поглощения и факторам резонансного самоэкранирования для U-238

№ гр.	E, кэВ	$\langle \sigma_c \rangle$, бн			$f_c(\sigma_0=) \times 100$			$\langle \sigma_c \rangle f_c(\sigma_0=0)$, бн		
		БНАБ-70	БНАБ-78	Экспер. а)	БНАБ-70	БНАБ-78	Экспер. б)	БНАБ-70	БНАБ-88	Экспер.
9	46,5-100	0,26	0,26	0,31 \pm 0,04						
10	21,5-46,5	0,45	0,45	0,44 \pm 0,03	93	90	86 \pm 5	0,415	0,407	0,395 \pm 25
11	10-21,5	0,66	0,60	0,55 \pm 0,03	86	83	68 \pm 5	0,570	0,498	0,440 \pm 25
12	4,65-10	0,90	0,81	0,75 \pm 0,03	73	71	62 \pm 4	0,666	0,577	0,551 \pm 30
13	2,15-4,65	1,30	1,24	1,22 \pm 0,05	54	55	52 \pm 4	0,700	0,687	0,679 \pm 38
14	1-2,15	2,0	1,70	1,82 \pm 0,10						
15	0,465-1	3,0	3,3	3,2 \pm 0,25						

а) Обработка при фиксированных значениях f_c

б) Обработка при фиксированных значениях $\langle \sigma_c \rangle$

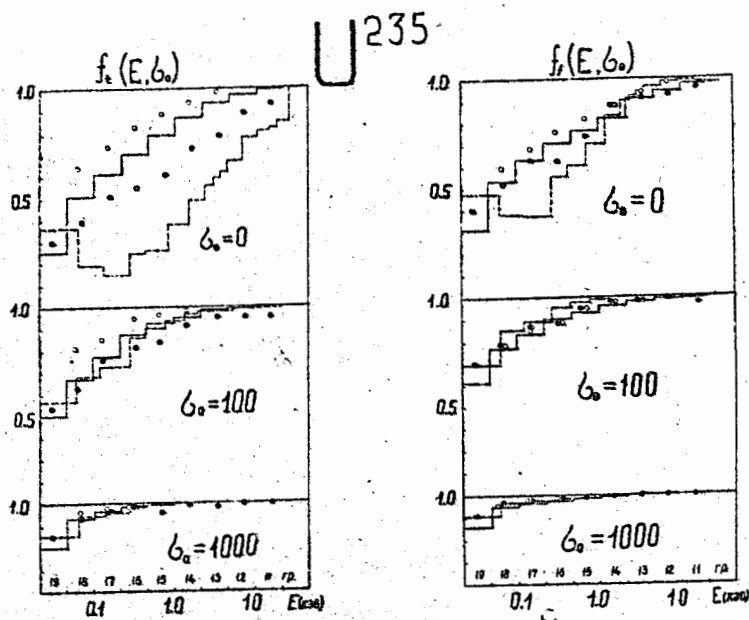


Рис. 1. Факторы резонансного самоэкранирования (для разных сечений разбавления) полного сечения и сечения деления ^{235}U .
 ● - результаты измерений; □ - оценка БНАБ-78;
 ▴ - оценка ENDF/B III ; ○ - оценка UKNDL.

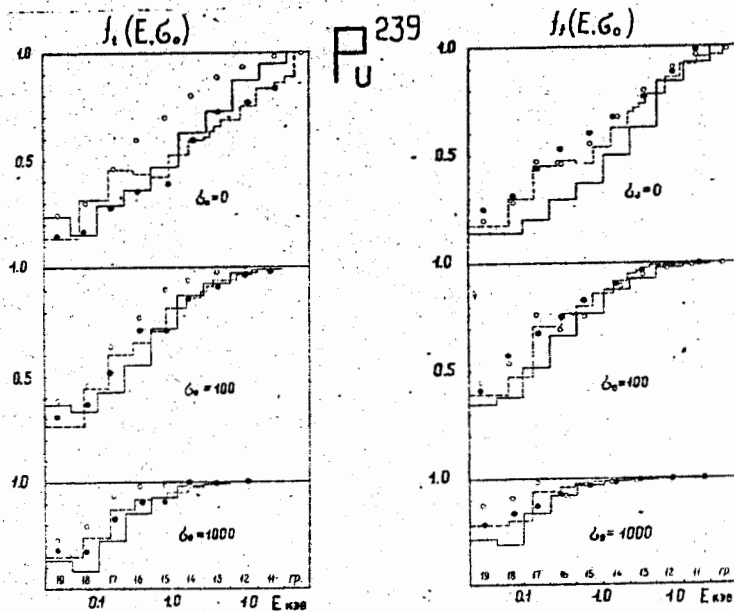


Рис. 2. Факторы резонансного самоэкранирования (для разных сечений разбавления) полного сечения и сечения деления ^{239}Pu .
 ● - результаты измерений; □ - оценка БНАБ-78;
 ▴ - оценка ENDF/B III ; ○ - оценка UKNDL.

влияния функций распределения сечений. При сравнении средних полных сечений обращает на себя внимание различие экспериментальных и оцененных данных для P_U-239 (занижение последних).

Представлены также результаты измерений ряда "опорных" величин на фотонейтронах при энергии $(24 \pm 1,2 \text{ кэВ})$. Эксперименты в сферической геометрии были выполнены в 1965-67 гг., их повторный анализ и обработка с учетом дополнительной информации не выявили необходимости сколь-нибудь заметной коррекции результатов по сравнению с их погрешностью. Сравнение этих результатов с наиболее последними оцененными данными (табл. 3) показывает хорошее согласие и свидетельствует о надёжности использованных экспериментальных методик. Полученные значения "опорных" величин в свое время сыграли важную роль в ядерно-физических оценках для быстрых реакторов.

Таблица 3

Сравнение результатов измерений при энергии нейтронов 24 кэВ с современными оценками

Величина	U-235		P _U -239	
	Эксперимент (1967)	Оценка (1978)	Эксперимент (1967)	Оценка (1978)
$V_{эф}$	$1,79 \pm 0,06$	$1,76 \pm 0,05$	$2,15 \pm 0,06$	$2,12 \pm 0,05$
α	$0,35 \pm 0,04$	$0,37 \pm 0,05$	$0,35 \pm 0,04$	$0,36 \pm 0,05$
$\sigma_j, \text{ бн}$	$2,25 \pm 0,20$	$2,2 \pm 0,2$	$1,95 \pm 0,20$	$1,7 \pm 0,2$

Общие итоги и выводы, касающиеся экспериментальных результатов.

- I. Получены следующие оригинальные результаты для U-238.
 - а) функции пропускания $T(t)$ и функции распределения полного сечения $P(\sigma)$;
 - б) подгрупповые параметры полного сечения и сечения поглощения;
 - в) средние полные сечения;

- г) факторы резонансного самоэкранирования и температурные приращения заблокированных транспортных сечений;
- д) заблокированные сечения поглощения, а также средние сечения и факторы резонансного самоэкранирования;
- е) средние резонансные параметры (новые оценки из данных в неразрешенной области).

II. Делаются следующие выводы, касающиеся экспериментальных результатов для U-238:

а) благодаря глубоким ослаблениям экспериментальных функций пропускания и сравнительно высокой точности была реализована возможность их обработки с целью восстановления функций распределения сечений $P(\sigma)$ с подробным разбиением. Такое представление экспериментальной информации является обобщением подгруппового представления и более точно отражает реальную структуру сечений, наличие пиков в $P(\sigma)$.

б) полученные из эксперимента средние полные сечения обнаруживают тенденцию к завышению на ~10% по сравнению с существующими оценками в области неразрешенных резонансов, в области разрешенных резонансов согласие более удовлетворительное. В то же время экспериментальные факторы резонансного самоэкранирования полного сечения указывают на наличие более сильной неразрешенной резонансной структуры, чем в расчете. Для эффективных транспортных сечений согласие более удовлетворительное.

в) расчетно-экспериментальное сравнение доплер-эффекта в функциях пропускания и (μ_j) -самоиндикации свидетельствует о качественно неплохом описании эксперимента в рамках расчетной модели TAS. Однако флуктуации от группы к группе в экспериментальных данных гораздо значительнее, чем показывает расчет.

г) Оптимизационный расчетно-теоретический анализ экспериментальных данных в неразрешенной области привел к оценке средних резонансных параметров. Была показана зависимость этих оценок от толщины образцов. При оптимизации данных на малых толщинах смещения априорных значений средних резонансных параметров сравнительно невелики. Однако привлечение данных на больших толщинах приводит к крайне низкой оценке R-силовой нейтронной функции. Сделан вывод о существенном влиянии приближений расчетной модели на результаты, соответствующие глубоким ослаблениям.

д) получены новые абсолютные результаты из экспериментов в сферической геометрии. Совместный анализ экспериментов в хорошей геометрии и сферической геометрии позволил уточнить существующие данные по средним сечениям радиационного захвата и его факторам резонансного самоэкранирования. Был сделан вывод о том, что эффект резонансного самоэкранирования сечений захвата более сильный по сравнению с его оценками в системах групповых констант в неразрешенной области энергий нейтронов. Был сделан также важный вывод о необходимости понижения оценок сечения σ_c ($U-238$) и его факторов резонансного самоэкранирования в области неразрешенных резонансов.

Ш. Получен новый экспериментальный материал, касающийся средних полных сечений, величин "альфа", сечений деления и их факторов резонансного самоэкранирования для $U-235$ и $Pu-239$. Наиболее актуальной является информация, уточняющая факторы резонансного самоэкранирования сечения деления $U-235$ и $Pu-239$. Рекомендуемая переоценка f_p для $Pu-239$ в сторону увеличения ведет к важным последствиям в физике быстрых реакторов. Результаты наших "опорных" измерений величины "альфа" и сечения деления находятся в хорошем согласии с современными рекомендованными данными, что является дополнительным свидетельством надежности использованного метода измерений.

Таким образом, новый экспериментальный материал, касающийся средних характеристик резонансной структуры нейтронных сечений $U-235$, $U-238$, $Pu-239$, достаточно полно представлен в четвертой и пятой главах как в численном (табличном) виде, так и в графическом. Выводы, вытекающие из анализа результатов делаются с позиций ядерно-физической теории. Отмечается трудности теоретического анализа данных для делющихся ядер (работа в этом направлении проводится). Проведено сравнение экспериментальных данных с оценками в системах ядерно-физических констант, оценены их расхождения с экспериментом и погрешности этих расхождений. Полученные результаты рекомендуются для оценок в последующих версиях ядерно-физических констант. (Анализ нейтронных данных, полученных в экспериментах автора диссертации и в работах других авторов, с позиций физики быстрых реакторов делается во второй части диссертации).

Шестая глава завершает первую часть диссертации. Демонстрируется применение метода пропускания нейтронов в реакторно-физических измерениях для решения проблемы неразрушающего контроля изотопного состава материалов, а также принципиальная возможность измерений нейтронного спектра в быстрых реакторах. По существу это есть распространение использованного ядерно-физического метода исследования на другой класс задач. Высказаны также идеи по обнаружению следующих новых эффектов, связанных с диффузией и замедлением резонансных нейтронов:

а) зависимость альbedo от поляризации быстрых нейтронов, возникающей при рассеянии на ядрах отражателя (в частности, уранового бланкета) за счет спин-орбитального взаимодействия;

б) квазиупругое рассеяние резонансных нейтронов в кристаллической решетке, возникающее при смещении атома при условии, что время жизни компаунд-ядра превышает время смещения атома. Показано, что при этом, кроме потери энергии за счет упругого рассеяния, нейтрон теряет дополнительную энергию, равную энергии связи атома в решетке. Показано продолжение этого эффекта в характеристиках процесса замедления нейтронов, а также возможность его использования в исследованиях в области ядерной физики и физики твердого тела. Предложена постановка соответствующего эксперимента с урановыми образцами.

Вторая часть диссертации посвящена методологическим вопросам анализа физического эксперимента, проблеме интерпретации и использования экспериментальных данных. В разделах, содержащих численные результаты, речь в первую очередь идет об использовании нейтронных микроскопических и интегральных данных для уточнения физических параметров быстрых реакторов.

В седьмой главе развивается единый подход (метод статистической регуляризации) к обработке и использованию экспериментальной информации в условиях неопределенности исходных данных и расчетной модели, разработаны оригинальные методы анализа.

Последняя глава посвящена анализу совокупности нейтронных экспериментальных данных (на базе развитого в гл.7 аппарата математической статистики) с целью их реакторно-физиче-

ческих приложений - уточнения реакторных параметров. Главный итог, на котором сконцентрировано внимание - это уточнение параметров критичности и воспроизводства за счет новой экспериментальной информации. Показывается, что полученные выводы подтверждаются сравнительным анализом международных данных, в частности, расчетами по последней версии системы констант БНАБ-78.

К второй части диссертации делаются следующие выводы:

I. Развита и обоснована единая методика к задачам обработки, анализа и интерпретации физических экспериментов. Подход тесно связан с корректным решением общей проблемы надежности научного вывода. Позиция автора заключается в последовательном применении статистической теории и критики необоснованных отступлений от нее, что приводит к формулировке метода статистической регуляризации в рамках байесовской концепции. Отсюда вытекают частные методы корректировки, переноса и др.

Разработана общая методология интегрального эксперимента. Детально изучены многие важные вопросы анализа и планирования реакторно-физических экспериментов с целью оценки их информативности для предсказания реакторных параметров. Предложена новая идеология анализа - метод "переноса". Его существенной особенностью является установление корреляций между реакторными параметрами и экспериментальными величинами, минуя стадию корректировки констант. При этом получается устойчивая оценка параметров и их погрешностей, слабо подтвержденная влиянием приближений расчетных моделей. Реализованы конкретные алгоритмы метода статистической регуляризации, его эффективность продемонстрирована на многих примерах физических и оптимизационных задач. Эти алгоритмы были использованы как для предварительной обработки наших экспериментов, так и для их окончательного анализа и интерпретации в рамках ядерно-физических и реакторно-физических моделей.

II. Получены оценки погрешностей основных реакторно-физических характеристик (параметров критичности и воспроизводства, доплеровского и натриевого коэффициентов воспроизводства, отношения средних сечений реакций, определяющих нейтронный баланс) как результат всестороннего анализа погрешностей

Таблица 4

Предсказание параметров критичности и воспроизводства
большого быстрого реактора БН-1500

П а р а м е т р	Погрешность расчета БНАБ-70	После учета экспериментов по уточнению констант U-238 и ρ -239		После дополнительной переоценки сечений ρ -240 и ρ -241	
		Погрешность	Смещение расчетного значения	Погрешность	Смещение расчетного значения
Коэффициент критичности	$\pm 5\%$	$\pm 3\%$	$+1,4\%$	$\pm 2\%$	$-0,1\%$
	$\pm 0,09$	$\pm 0,07$	$-0,06$	$\pm 0,06$	$-0,08$
Коэффициент воспроизводства в активной зоне	$\pm 0,08$	$\pm 0,06$	$-0,06$	$\pm 0,05$	$-0,08$
	$\pm 25\%$	$\pm 20\%$	$+10\%$	$\pm 15\%$	$+15\%$
Время удвоения					

микроскопических и интегральных экспериментов, а также погрешностей подготовки групповых констант с учетом ковариационных матриц тех и других данных. Основные результаты по этим оценкам были подтверждены сравнительным анализом различных отечественных и зарубежных систем ядерных данных.

III. В результате проведенной работы по анализу большой совокупности наших экспериментальных данных и других микроскопических и интегральных данных была решена проблема ядерно-физического уточнения параметров критичности и воспроизводства перспективного плутониевого бридера. Задача заключалась в оценке погрешности расчета по системе констант БНАБ-70 (уровень данных 1970г.) и погрешности расчета и смещения значений параметров после привлечения новой информации. Результаты нашего предсказания (1975г., см. табл. 4) очень хорошо подтвердились в настоящее время, после перехода на новую версию констант БНАБ-78. Отметим, что в этой системе констант нашли свое отражение также наши экспериментальные результаты для $U-235$, $U-238$, $P_{\beta}-239$.

В ОБЩЕМ ЗАКЛЮЧЕНИИ выделены наиболее существенные результаты диссертации.

I. Сформулирована задача экспериментального изучения резонансной структуры нейтронных сечений тяжелых топливно-сырьевых изотопов и программа соответствующих экспериментов. Разработаны методики экспериментального изучения резонансной структуры в широкой энергетической области путем измерения функций пропускания и самоиндикации на спектрометре импульсного быстрого реактора ИБР. Разработаны методики обработки и расчетно-теоретического анализа результатов эксперимента.

2. Получен обширный экспериментальный материал по средним нейтронным сечениям и их средним резонансным характеристикам для изотопов $U-235$, $U-238$, $P_{\beta}-239$, важный для физики атомного ядра. Была принципиально решена задача прямого экспериментального определения средних резонансных характеристик полных и парциальных нейтронных сечений в неразрешенной области. Большая часть экспериментальных результатов является оригинальной и получена впервые.

3. Осуществлена экспериментальная проверка большой группы ядерно-физических констант. Одним из наиболее существенных для физики быстрых реакторов является вывод о необходимости уменьшить значения среднего сечения $\sigma_c(U-238)$ и его факторов резонансного самоэкранирования в области неразрешенных резонансов, увеличить факторы резонансного самоэкранирования $f_{\beta}(P_{\beta}-239)$ по сравнению с существующими оценками. Коррекция этой группы констант в указанных направлениях впоследствии была произведена под руководством М.Н. Николаева при подготовке новой системы констант БНАБ-78, на основе анализа совокупности экспериментальных данных, включая данные наших экспериментов. Наши результаты были использованы также в обменном фонде международной библиотеки.

4. Развит и обоснован единый подход к задачам обработки, анализа и интерпретации физических экспериментов, который связан с общей проблемой надежности научного вывода. Позиция автора заключается в последовательном применении классической статистической теории и критике необоснованных отступлений от нее, что приводит к формулировке метода и соответствующего алгоритма "статистической регуляризации". Суть метода заключается в использовании статистических ограничений (априорной информации) в решении обратной задачи. При этом анализируются все виды погрешностей, включая погрешность теоретической и математической модели. Как частный случай, предложен метод "переноса" для анализа реакторно-физических экспериментов, корректно предсказывающий значения и ошибки параметров с минимальным влиянием расчетных приближений. Детально исследована также методика корректировки констант, сформулированы критерии её правомерности.

Следует отметить, что в литературе обсуждаются различные подходы к решению обратных (или "некорректных") задач с позиций статистического метода, и под термином "статистическая регуляризация" могут пониматься различные методы. В нашей трактовке имеется в виду метод, использующий ковариационные матрицы в качестве априорной и экспериментальной информации и выдающий апостериорную ковариационную матрицу решения.

5. На основе совокупного анализа ядерно-физических данных, систем констант и интегральных данных произведена оценка основных реакторно-физических параметров перспективного плутониевого бридера. Наиболее важным является полученный в 1975 г. результат предсказания (уточнения расчетов по системе БНАБ-70) параметров критичности и воспроизводства. Тем самым была решена константная проблема воспроизводства (по ее состоянию на 1975 год), являющаяся предметом широких обсуждений в начале 70-х годов. Полученные нами (в середине 70-х годов) выводы о расчетном завышении критической массы P_{U-239} и коэффициента воспроизводства, о роли констант продуктов деления и высших изотопов плутония, имели важное практическое значение для расчета быстрых реакторов и перспективных проработок, а также для подготовки общественног мнения о необходимости перехода к новой версии системы констант. В ряду выявленных причин, приведших к ошибочному завышению КВ и КВА (на 0,08 для реактора типа БН-1500 с "грязным" плутонием), важное место занимает эффективное сечение $\sigma_c(U-238)$. Интересно отметить, что переход от БНАБ-70 к БНАБ-78 привел к уменьшению КВ и КВА именно на предсказанную нами величину 0,08.

6. Прделанная и планируемая работа по экспериментальному изучению резонансной структуры нейтронных сечений с ядерно-физическими приложениями результатов для теории атомного ядра и для физики быстрых реакторов по существу характеризует направление, перспективное с точки зрения продолжения экспериментов в условиях более мощного источника нейтронов. Эта перспектива рассмотрена в диссертации на конкретных предложениях новых экспериментов по изучению структуры парциальных сечений (в первую очередь сечения радиационного захвата) и ряда других неисследованных ранее эффектов.

Таким образом, научная ценность полученных ядерно-физических результатов определяется их важностью для ядерно-физической теории, описывающей резонансную структуру нейтронных сечений статистическим образом. Представленная информация в большой своей части является оригинальной и получена впервые. Практическая значимость полученных ядерно-физических

результатов и результатов их использования в совокупности с другими нейтронными данными определяется потребностями, которые диктуются современным развитием в СССР ядерной энергетики и существованием проблемы создания надежного и экономичного бридера - энергетического реактора на быстрых нейтронах с хорошими показателями воспроизводства ядерного горючего.

Основные методические и численные результаты автора содержатся в следующих публикациях:

1. Ваньков А.А. Некоторые важные вопросы анализа реакторно-физических данных. Симпозиум по состоянию и перспективам работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Сборник докладов. Атомиздат, 1975, т.3, с.633.
2. Ваньков А.А., Воропаев А.И. Оценка константной погрешности реакторного расчета. Атомная энергия, 1975, т.39, № 2, с. III.
3. Ваньков А.А., Воропаев А.И. Корректировка групповых констант. Атомная энергия, 1975, т. 39, № I, с. 5I.
4. Ваньков А.А., Воропаев А.И., Орлов В.В. О корреляции параметров критичности и воспроизводства. Атомная энергия, 1975, т.39, № 2, с.110.
5. Ваньков А.А., Воропаев А.И., Ракитин И.Д. Оценка погрешности предсказания доплеровского и нагревного коэффициентов реактивности. В кн.: Вопросы атомной науки и техники, серия "Ядерные константы", М., Атомиздат, 1974, вып.16, с.20.
6. Воропаев А.И., Ваньков А.А., Колосков Б.В., Троянов М.Ф. Тенденции в оценках параметров критичности и воспроизводства перспективного бридера. В кн.: Вопросы атомной науки и техники, серия "Ядерные константы", М., Атомиздат, 1975, вып. 20, ч.2, с.112.
7. Воропаев А.И., Ваньков А.А., Возяков В.В. и др. Влияние изменений в оценках констант изотопов плутония на физические характеристики большого реактора. В кн.: Вопросы атомной науки и техники, серия "Ядерные константы", М., Атомиздат, 1977, вып.25, с.69.

8. Ваньков А.А., Григорьев Д.В., Николаев М.Н. и др. Отчет о работах по доплер-эффекту в быстрых реакторах. Симпозиум СЭВ по состоянию и перспективам работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Сборник докладов, Атомиздат, 1967, т.2, с.245.
9. Ваньков А.А. К вопросу о флуктуационном анализе нейтронных сечений. Доклад на конференции по ядерной спектроскопии, Материалы конференции, Москва, январь 1966.
10. Беланова Т.С., Ваньков А.А., Михайлус Ф.Ф., Ставиский Ю.Я. Абсолютные измерения сечений поглощения нейтронов с энергией 24 кэВ. Атомная энергия, 1965, т.19, вып.3, с. 3.
11. Ваньков А.А., Михайлус Ф.Ф. Расчет пропускания нейтронов в сферической геометрии методом Монте-Карло. В кн.: "Метод Монте-Карло в проблеме переноса излучений", М., Атомиздат, 1967, с.131.
12. Ваньков А.А., Григорьев Д.В., Николаев М.Н., Орлов М.Д. Определение абсолютного сечения поглощения нейтронов для урана-238 из опытов по пропусканию. В кн.: "Вопросы атомной науки и техники", серия "Ядерные константы", Атомиздат, 1972, вып. 9, с.44.
13. Ваньков А.А., Ставиский Ю.Я. Измерение среднего числа нейтронов деления, испускаемых на один акт захвата нейтронов с энергией 24 кэВ для урана-235 и плутония-239. Атомная энергия, 1965, т.19, вып.1, с.41.
14. Ваньков А.А. Байесовский подход в интерпретации результатов физических экспериментов. В кн.: Вопросы атомной науки и техники, серия "Ядерные константы", М., Атомиздат, 1974, вып.16, с.11.
15. Ваньков А.А., Григорьев Д.В., Николаев М.Н. и др. Температурная зависимость структуры полного сечения урана-238 в области неразрешенных резонансов. Proc. of an internat. conf. Nuclear Data for Reactors. Helsinki, 1970, IAEA, Vienna, 1970, v.1, p. 559. См. также: Ваньков А.А., Григорьев Д.В., Николаев М.Н. и др. Структура сечений урана-238 в области неразрешенных резонансов.

- Труды трехстороннего советско-бельгийско-голландского симпозиума по некоторым проблемам физики быстрых реакторов. Меленесс, 1970, М., Атомиздат, 1970, т.1, доклад Д-21.
16. Ваньков А.А., Григорьев Д.В., Николаев М.Н. и др. Среднегрупповые полные сечения для изотопов урана-235, урана-238, плутония-239. В кн.: Нейтронная физика (материалы 2-ой Всесоюзной конференции, Киев, 1973), Обнинск, Атомиздат, 1974, ч.2, с.213.
 17. Ваньков А.А., Григорьев Д.В., Бемер Б., Дитце К. Анализ экспериментальных данных по пропусканию для урана-238 с целью определения средних резонансных параметров. В кн.: Ядерные константы, М., Атомиздат, 1973, вып.12, ч.1, с.63.
 18. Ваньков А.А., Григорьев Д.В., Цибуля А.М., Бемер Б., Дитце К. Измерение сечений нейтронного поглощения урана-238 методом пропускания в сферической геометрии. В кн.: Нейтронная физика (материалы 3-й Всесоюзной конференции, Киев, 1975), М., Атомиздат, 1976, ч.3, с.200.
 19. Ваньков А.А., Григорьев Д.В., Украинцев В.Ф. и др. Измерение функций пропускания для урана-235 с целью определения характеристик резонансной структуры полного сечения и сечения деления в области энергий 0,002-20 кэВ. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерные константы", М., Атомиздат, 1979, вып. 4(35), с.42.
 20. Ваньков А.А., Григорьев Д.В. Оценка точности неразрушающих методов контроля зажигания и воспроизводства топлива энергетического реактора. Труды II Симпозиума СЭВ по состоянию и перспективам работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, Обнинск, 1973, Атомиздат, 1975, т.3, с.664.
 21. Ваньков А.А. К вопросу о роли энергии связи тяжелых атомов в кристалле для определения сечения смещений и сечения замедления при резонансном рассеянии нейтронов. В кн.: Вопросы атомной науки и техники, серия "Ядерные константы", М., Атомиздат, 1979, вып.4(35), с.67.

22. Ваньков А.А., Воропаев А.И., Цибуля А.М. Зависимость альбедо от поляризации быстрых нейтронов, возникающей при рассеянии на ядрах отражателя. Атомная энергия, 1974, т.37, вып.2, с.168.
23. Беланова Т.С., Ваньков А.А. и др. Абсолютные измерения сечений поглощения нейтронов. Proc. of an internat. conf. Nuclear Data for Reactors. Paris, 1967. IAEA, Vienna, 1967, v.1, p. 455.
24. Ваньков А.А., Воропаев А.И., Дрова Л.Н. Анализ реакторно-физического эксперимента, М., Атомиздат, 1977.
25. Воротынцев М.Ф., Ваньков А.А., Воропаев А.И. и др. Детальный расчет энергетического спектра нейтронов и проблема подготовки групповых констант. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерные константы". М., Атомиздат, 1976, вып.21, с.147.
26. Воропаев А.И., Ваньков А.А., Цибуля А.М. Сравнение расчетов стандартного быстрого реактора (модель Бейкера). Атомная энергия, 1978, вып.6, т.45, с.419-426. См. также: Воропаев А.И., Ваньков А.А., Цибуля А.М. Comparison of calculations of standard fast reactor. INDC(GPP)-125/LV, IAEA, Vienna, oct. 1978.
См. также:
Воропаев А.И., Ваньков А.А., Цибуля А.М. Сравнение расчетов стандартного быстрого реактора. Атомная энергия, 1979, т.47, вып.4, с.274.
27. Стависский В.Я., Абрамов А.И., Ваньков А.А. и др. Радиационный захват быстрых нейтронов. М., Атомиздат, 1970.
28. Bakalov T. et al. (JINA), Vankov A.A. et al. (IFE). Transmission and self-indication measurements with U-235 and Pu-239 in the 2 eV - 20 keV energy region. Proc. of an internat. conf. Nuclear Cross-Sections for Technology, Knoxville, 1979.