

К-647

На правах рукописи

КОНОНОВ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ

**Экспериментальное изучение величины альфа,
сечений захвата нейтронов и средних резонансных
параметров топливно-сырьевых реакторных
материалов и продуктов деления**

(Специальность 01.04.16 — Физика атомного ядра
и элементарных частиц)

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

Дубна — 1980 г.

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени Физико-энергетическом институте ГКАЭ СССР.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Ю. П. Попов

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Г. В. Мурадян

доктор физико-математических наук,
профессор

Г. Н. Смиренин

Ведущее предприятие — Институт ядерных исследований АН СССР.

Защита состоится *28. апреля* 1980 года в *11.* час.
на заседании специализированного совета Д.047.01.05 при лаборатори-
и нейтронной физики и лаборатории ядерных реакций Объединенно-
го института ядерных исследований (г. Дубна, Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан *24. марта* 1980 года.

Ученый секретарь
специализированного совета

Ю. В. Таран
Ю. В. ТАРАН.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

В диссертации приводятся результаты исследований автора по экспериментальному изучению ряда наиболее важных сечений взаимодействия нейтронов для реакторных материалов в области энергий от нескольких кэВ до 1 МэВ. Работа выполнялась в ФЭИ ГКАЭ СССР и находилась в тесной связи с тематикой быстрых реакторов. Большое место в проводившихся исследованиях занимало экспериментальное изучение особенностей взаимодействия нейтронов с различными орбитальными моментами с атомными ядрами и получение новой экспериментальной информации о p - и d -волновых нейтронных и радиационных силовых функциях. Таким образом, в диссертации нашли отражения две области ядерно-физических исследований: а) изучение структуры высоковозбуждённых состояний ядер и механизма ядерных реакций; б) получение ядерных данных для основных топливно-сырьевых реакторных материалов и продуктов деления.

Актуальность проблемы. Спектр нейтронов в быстром энергетическом реакторе простирается от нескольких десятков эВ до нескольких МэВ, причём, около 90% реакций деления и радиационного захвата, наиболее важных с точки зрения основных технических и экономических характеристик реакторов, происходит при энергии нейтронов выше 1 кэВ, которая для средних и тяжёлых ядер является областью плохо разрешённых и неразрешённых резонансов.

Современные методы расчёта реакторов на быстрых нейтронах, использующие многогрупповой подход, требуют детального знания большого числа ядерных данных, в первую очередь нейтронно-физических характеристик топливно-сырьевых материалов. Однако, несмотря на многочисленные исследования в области нейтронной физики, которые интенсивно проводились во всём мире в течение двух последних десятилетий, имеющиеся в настоящее время неопределённости в ядерных данных приводят пока ещё к слишком большим погрешностям в расчётных значениях реакторных параметров. Это в свою очередь приводит к необходимости при проектировании реакторов предусматривать соответствующие "запасы", что связано с большими экономическими потерями. В последние годы приобрело особую важность исследование оптимальных направлений развития промышленной ядерной энергетики с реакторами-размножителями на быстрых нейтронах. Отсюда проистекает большое значение ядерных данных и те высокие требования, которые предъявляются к точности и надёжности их измерения.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

Одной из ключевых ядерных констант для расчёта быстрых реакторов является величина "альфа" ^{239}Pu и ^{235}U , равная отношению сечений радиационного захвата и деления $\alpha = \sigma_c / \sigma_f$. Величина α оказывает непосредственное влияние на важнейшие характеристики быстрого реактора - коэффициент воспроизводства и время удвоения ядерного топлива.

Другой величиной, также сильно влияющей на основные характеристики быстрого реактора, является сечение радиационного захвата быстрых нейтронов в ^{238}U процесса, который определяет скорость наработки нового топлива ^{239}Pu . Особенность сечения захвата нейтронов в чётно-чётном ядре ^{238}U состоит в том, что сильная резонансная структура в нём проявляется до энергий нейтронов в несколько десятков кэВ. Так как концентрация ядер ^{238}U в зоне воспроизводства велика, наличие резонансной структуры снижает поглощение нейтронов из-за эффекта резонансного самоэкранирования. Это приводит к заметному смещению баланса нейтронов в быстром реакторе не в пользу расширенного воспроизводства. Большая роль резонансного самоэкранирования приводит к тому, что для надёжного предсказания параметров быстрого реактора кроме хорошего знания микроскопического сечения захвата быстрых нейтронов в ^{238}U требуется также знание о высокой точности факторов резонансной самоэкранировки этого сечения.

Анализ потребностей ядерных данных, неоднократно проводившийся в последние годы, показал, что основной вклад в неопределённость предсказания главных характеристик быстрых реакторов-размножителей вносят погрешности величин α ^{239}Pu и σ_c ^{238}U . Заметный вклад вносят также погрешности сечений захвата нейтронов в продуктах деления.

В настоящее время имеется три источника для получения ядерных данных, используемых при расчёте быстрых реакторов: а) прямое измерение нейтронных сечений ("микроскопические" эксперименты); б) расчётно-теоретические оценки; в) эксперименты на критических оборках и реакторах ("интегральные" эксперименты). Интегральные эксперименты служат для комплексной проверки ядерно-физического расчёта реактора и используются для корректировки групповых ядерных констант. Поэтому наиболее прямым путём обеспечения реакторных расчётов ядерными данными является детальное изучение нейтронных сечений. Этому вопросу посвящена большая часть диссертации.

Для многих ядер-продуктов деления произвести прямое измерение нейтронных сечений не представляется возможным, и единственным путём для получения ядерных данных является теоретический расчёт, основанный на использовании фундаментальных знаний о механизме ядерных реакций и структуре ядра. Несмотря на большие успехи, достигнутые в теоретическом описании нейтронных сечений в области энергий до $0,1 + 1$ МэВ, для их предсказания необходимы сведения о конкретных свойствах ядер, получаемые из эксперимента, главным образом методами нейтронной резонансной спектроскопии. К таким свойствам относятся в первую очередь средние параметры нейтронных резонансов: средние нейтронные, радиационные и делительные ширины, нейтронные оловые функции и среднее расстояние между нейтронными резонансами. В последние десятилетия накоплен богатый экспериментальный материал по этим величинам, исследованы также статистические свойства параметров нейтронных резонансов. Однако, с одной стороны точность определения некоторых параметров до сих пор остаётся недостаточной (это относится в первую очередь к плотности ядерных уровней), с другой стороны необходимо учитывать, что подавляющая часть информации о средних резонансных параметрах относится к s -нейтронам с орбитальным моментом $\ell = 0$. Мы ещё очень мало знаем о свойствах нейтронных резонансов, образованных p - и d -нейтронами, имеющими орбитальный момент $\ell = 1$ и 2 . Экспериментальные данные по p - и d -волновым нейтронным силовым функциям S_1 и S_2 малочисленны и имеют пока невысокую точность, а теоретические предсказания их поведения в зависимости от атомного веса далеко неоднозначны. Из эксперимента нам очень мало известно о радиационных ширинах и плотности резонансов, возбуждаемых p - и d -нейтронами. Поэтому приходится проявлять большую осторожность при расчётно-теоретических оценках нейтронных сечений в области плохо разрешённых и неразрешённых резонансов, например, в случае радиационного захвата нейтронов, для которого характерен большой вклад p - и d -нейтронов уже в килоэлектронвольтовой области. Таким образом, изучение структуры высоковозбуждённых состояний атомных ядер и дальнейшая разработка вопросов описания нейтронных сечений в рамках различных теоретических моделей представляется в настоящее время весьма актуальным. Эти вопросы в диссертации также занимают большое место.

Основные цели работы. Автор ставил перед собой следующие цели:

1. Разработка высокоэффективных универсальных методов экспериментального изучения сечений радиационного захвата быстрых нейтронов и важнейших ядерных данных для топливно-сырьевых материалов.
2. Получение новых экспериментальных данных по величине σ для ^{239}Pu и ^{235}U в области энергий нейтронов 10 кэВ - 1 МэВ. Экспериментальное изучение эффектов резонансного самоэкранирования в сечении радиационного захвата нейтронов в ^{238}U .
3. Систематическое изучение сечений радиационного захвата быстрых нейтронов для изотопов неделящихся ядер, в основном, в области редкоземельных элементов.
4. Дальнейшая разработка методов анализа средних сечений захвата нейтронов и получение новой экспериментальной информации о средних резонансных параметрах для s -, p - и d -нейтронов.
5. Исследование общих закономерностей в поведении сечений захвата быстрых нейтронов и нейтронных и радиационных силовых функций для нейтронов с различным значением орбитального углового момента.

Научная новизна. Разработанные автором методы исследований, детекторы и установки позволили получить в большом объеме новые экспериментальные данные по сечениям захвата быстрых нейтронов для широкого круга ядер, новые экспериментальные данные по величине σ для ^{239}Pu и ^{235}U . Существовавшие ранее результаты были разрозненны и противоречивы. Экспериментальные исследования факторов резонансного самоэкранирования сечения захвата быстрых нейтронов в ^{238}U автором было выполнено впервые. Автором предложен и реализован новый метод получения экспериментальных данных по d -волновым нейтронным силовым функциям, основанный на анализе поведения сечений захвата нейтронов в чётно-чётных ядрах вблизи порога неупругого рассеяния с возбуждением первого уровня 2^+ . Используя этот метод нами были впервые получены достаточно подробные данные по S_2 в области редкоземельных элементов, которые экспериментально подтвердили предсказание оптической модели ядра о существовании $3d$ -резонанса размеров в области $A = 140 - 180$. Впервые получены также некоторые другие закономерности в поведении нейтронных и радиационных силовых функций для s -, p - и d -нейтронов.

Научная и практическая ценность работы.

Новые экспериментальные данные по сечениям захвата быстрых нейтронов и величине σ были использованы при выработке ряда отечественных и зарубежных систем констант для расчёта реакторов на быстрых нейтронах. Рекомендованные нами значения величины σ ^{239}Pu прямо вошли в новую систему констант БНАБ-78 и в таком виде были использованы в физических расчётах промышленных реакторов на быстрых нейтронах. В этом состоит основное практическое значение проводившихся исследований. Некоторые новые методические разработки автора получили применение в ядерно-физических исследованиях, проводимых в ряде научно-исследовательских организаций страны.

Научная ценность работы состоит в систематическом экспериментальном исследовании общих закономерностей в поведении сечений захвата быстрых нейтронов и средних резонансных параметров для нейтронов с различными орбитальными моментами.

Основные положения, выносимые на защиту.

В результате проведенных автором исследований созданы методы, установки и развито новое перспективное направление экспериментального изучения сечений и средних резонансных параметров для s -, p - и d -нейтронов в области неразрешённых нейтронных резонансов с применением высокоэффективного спектрометра быстрых и резонансных нейтронов на базе импульсного электростатического генератора. Актуальность этого направления определяется необходимостью расширения экспериментальных исследований для изучения структуры высоковозбуждённых состояний атомных ядер и механизмов ядерных реакций и потребностями в ядерных данных развивающейся ядерной энергетики на быстрых нейтронах с расширенным воспроизводством ядерного топлива.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Методы экспериментальных исследований сечений радиационного захвата быстрых нейтронов, включающие высокоэффективный спектрометр быстрых и резонансных нейтронов, созданный на базе импульсного электростатического генератора, систему детекторов для регистрации событий захвата, деления и нейтронного потока. Абсолютные методы измерения сечений захвата нейтронов, величины альфа и факторов резонансного самоэкранирования.
2. Новые экспериментальные данные по величине альфа, сечениям захвата и факторам резонансного самоэкранирования для основных топ-

ливо-сирьезых реакторных материалов и продуктов деления в наиболее важной для реакторов на быстрых нейтронах области энергий.

3. Новые экспериментальные результаты по сечениям захвата быстрых нейтронов для большого числа изотопов редкоземельных элементов и новые данные по средним резонансным параметрам для нейтронов с различными орбитальными моментами.

4. Метод получения d -волновых нейтронных силовых функций.

5. Общие закономерности в поведении сечений радиационного захвата быстрых нейтронов в средних и тяжелых ядрах, выявленные в результате анализа полученного обширного экспериментального материала, которые свидетельствуют о преобладающей роли статистического механизма реакции радиационного захвата в области энергий до 500 кэВ.

6. Экспериментально установленные новые закономерности в поведении нейтронных силовых функций для p - и d -нейтронов и в соотношении радиационных силовых функций для s -, p - и d -нейтронов.

Объем работы. Диссертация изложена на 337 страницах машинописного текста, включая 81 рисунок, 20 таблиц и 220 страниц текста. Библиография включает 154 наименования, из них 64 - работы автора.

II. СТРУКТУРА И КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Диссертация состоит из трёх частей:

Часть I. Разработка экспериментальных методов и установок для исследования взаимодействия быстрых нейтронов с атомными ядрами.

Часть II. Экспериментальное изучение величины альфа, сечений радиационного захвата нейтронов и его факторов резонансного самоэкранирования для топливно-сирьезых реакторных материалов.

Часть III. Экспериментальные и теоретические исследования сечений радиационного захвата нейтронов и средних резонансных параметров для неделящихся ядер.

Первая часть диссертации состоит из трёх глав и содержит материал, относящийся к разработке и исследованию высокоэффективных экспериментальных методов изучения сечений взаимодействия быстрых нейтронов, имеющих важное значение для решения прикладных реакторно-физических задач и представляющих большой интерес с точки зрения исследования структуры высоко-возбужденных состояний атомных ядер и механизма ядерных реакций. В основу всех разработанных и созданных экспериментальных установок был положен метод времени пролёта,

являющийся наиболее универсальным и продуктивным. Большое внимание было сосредоточено на разработке и исследовании детекторных систем для изучения реакций деления, радиационного захвата и регистрации нейтронов.

В первой главе рассмотрены вопросы, связанные с созданием импульсного нейтронного источника на базе электростатического генератора, который является одним из главных элементов спектрометра нейтронов по времени пролёта. Обсуждаются различные варианты разработанных методов получения импульсного наносекундного режима работы ЭГ, описан импульсный источник спектрометра быстрых и резонансных нейтронов, построенный на базе ускорителя ЭГ-И ФЭИ. Получены следующие параметры импульсного пучка протонов на мишени ускорителя: ток в импульсе $0,3 + 0,5$ мА, длительность $15 + 25$ нсек и $0,1 + 1$ мксек при частоте следования в диапазоне 1 МГц $+ 1$ кГц в режиме простого прерывания; ток в импульсе $1,5 + 2,5$ мА и длительность импульсов $2 + 2,5$ нсек в режиме клистронной группировки. Рассмотрены пути дальнейшего улучшения его параметров. Подробно исследована реакция ${}^7\text{Li}(p, n)$ как источник нейтронов. Получена формула, описывающая абсолютный выход и спектр нейтронов из этой реакции в различных экспериментальных условиях. Обосновано предложение о применении этой реакции в качестве источника нейтронов для нейтронозахватной терапии.

Во второй главе содержатся результаты исследований автора по разработке методов регистрации и детекторов для измерения сечений захвата нейтронов и величины λ . В основу созданных установок положен метод регистрации захвата нейтронов и деления по мгновенным γ -лучам. Разработаны и использованы в экспериментах три вида больших жидкостных сцинтилляционных детекторов, исследован и получил дальнейшее развитие метод определения полной энергии γ -лучей. Предложен новый принцип получения сигнала в ионизационных детекторах, в результате применения которого были созданы высокоэффективные ионизационные камеры деления с рекордными параметрами. Разработаны и исследованы детекторы для измерения потока нейтронов. Основные характеристики разработанных детекторов приведены в таблице I.

В третьей главе рассмотрены общие характеристики созданного на базе импульсного ускорителя ЭГ-И ФЭИ спектрометра быстрых и резонансных нейтронов, проведено сравнение параметров спектрометра

Таблица 2.
Основные характеристики разработанных детекторов.

| № | Детектор | Измеряемые величины | Тип счетного штурга | Эффективный диаметр, мм | Количество тел ФЭУ | Время разрешения, мкс | Эффективность ф. детекции | Год завершения работ |
|-----|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|
| 1. | ЭФД | α, β, γ | Э-1 + 4х 10 ₉ | φ 500 | 16 887-24 | 10 | 50% К | 1963 |
| 2. | ЭФД с СД малых размеров | α, β, γ | Э-1 + 4х 10 ₉ | φ 750 | 8 897-49 | 8 | 50% К, ф | 1967 |
| 3. | ЭФД | α, β, γ | Э-52 Э-1 + 60х 10 ₉ | φ 320 | 8 897-56 | 1,9 | 40% К, ф | 1969 |
| 4. | ДПВ | β, γ | Э-52 | φ 100 | 1 687-30 | 1,5 | 10% К | 1976 |
| 5. | ДПВ | β, γ | каплевидная | φ 150x0,8 | 1 687-30 | 1,5 | 5% К | 1977 |
| 6. | Детектор малых размеров на 239Pu | α, β, γ | - | - | - | - | 75% осталога | 1967 |
| 7. | Детектор малых размеров на 239Pu | α, β, γ | - | - | - | - | 75% осталога | 1967 |
| 8. | Детектор с 611 каналом | α, β, γ | Э-908 Э-912 | φ 150,8 φ 121,0 | 1 687-30 | 2,1 | 0,1412 о.а. | 1976 |
| 9. | Детектор с плотностью 10 ⁹ | $\alpha, \beta, \gamma, \tau$ | NaJ(Tl) 2шт. φ 60x50 | φ 500 | 2 637-30 | 2,0 | 1 + 40% о.а. | 1976 |
| 10. | Детектор с кристаллами CsI | $\alpha, \beta, \gamma, \tau$ | стационарный | φ 30x20 | 1 687-30 | 0,5 | 0,1 + 75 о.а. | 1976 |
| 11. | Детектор (Si-As) типа лавинный | τ | - | φ 10 | - | 0,38 | 30% о.а. | 1976 |
| | | | | | | | 100% ост. | 1976 |

Примечания: Э-1 - оцифратор на основе СЧУ
 Э-52 - оцифратор на основе СЧУ

с подобными установками другого типа. Сделан вывод, что параметры созданного спектрометра в области быстрых нейтронов сравнимы, а для ряда применений превосходят характеристики лучших спектрометров на базе линейных ускорителей электронов.

Материал первой части диссертации отражает проводившиеся на протяжении ряда лет автором исследования по разработке методических вопросов, связанных с созданием импульсного источника нейтронов на базе ЭГ, сложных детекторных систем для измерения сечений радиационного захвата быстрых нейтронов и величины α , спектральной аппаратуры для проведения временного и амплитудного анализа. Многие методические решения предложены и реализованы автором впервые. Параллельно с работой по созданию экспериментальных установок велась разработка методик конкретных экспериментов, проводились измерения и анализировались их результаты. Такая организация работы создавала условия для постоянного совершенствования как самой экспериментальной установки, так и применявшихся методик проведения ядерно-физических исследований. В результате этих усовершенствований был создан спектрометр быстрых и резонансных нейтронов на базе электростатического генератора ЭГ-1 ФЭМ, являющийся весьма перспективной установкой для проведения исследований взаимодействия быстрых нейтронов с атомными ядрами.

Вторая часть диссертации посвящена экспериментальному изучению важнейших ядерных данных для топливно-сырьевых реакторных материалов и состоит из двух глав.

В четвертой главе подробно рассмотрен разработанный автором абсолютный метод измерения величины α , приведены результаты измерений величины α для ²³⁹Pu и ²³⁵U и проанализированы источники случайных и систематических погрешностей полученных экспериментальных данных. Рассмотрены вопросы построения ковариационной матрицы совокупности экспериментальных данных. Описан предложенный автором эксперимент по измерению величины α ²³⁹Pu на спектрометре нейтронов в Дубне, проводившийся совместно с сотрудниками ЛФФ ОИЯИ. В диссертации рассмотрено состояние экспериментальных данных по величине α ²³⁹Pu и выработаны рекомендованные значения, представленные для области энергий нейтронов 1 кэВ - 1 МэВ на рис.1, на котором также приведены результаты абсолютных измерений величины α , выполненные автором в 1969 - 1973г.г., и итоговые результаты измерений, проводившихся в Ок Ридже.

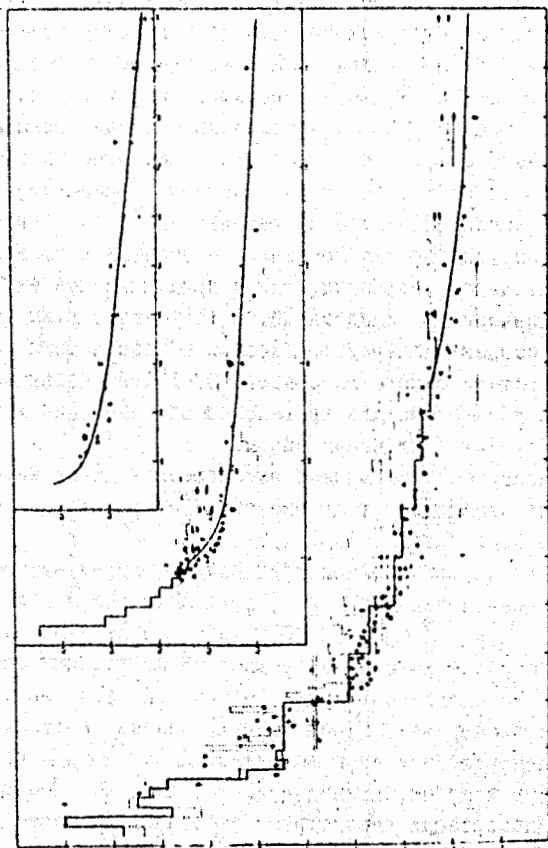


Рис. 1. Энергетическая зависимость величины k ^{239}Pu в области энергий нейтронов 1 кэВ - 10 МэВ, — оценка Кононов-Подетаева; ● - результаты абсолютных измерений, полученные автором в 1969-1973г.г.; - итоговые результаты измерений, проводившихся в Ок Ридже.

Основываясь на изучении условий проведения измерений и анализе опубликованных подробных результатов, в диссертации сделан вывод о невысокой надёжности экспериментальных данных по величине k ^{239}Pu , полученных на спектрометре ORELA при энергии нейтронов выше 10 + 20 кэВ.

Наряду с рекомендованными (оценёнными) значениями величины k ^{239}Pu в диссертации приведены также групповые значения k и β_c для ^{239}Pu , их корреляционная матрица и полные погрешности. В терминах среднего по спектру стандартного быстрого реактора значения величины k ^{239}Pu произведено сравнение ряда оценок и продемонстрирована роль корреляций в совокупность экспериментальных данных. Эти результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2

Сравнение различных оценок величины k плутония-239, усреднённых по спектру нейтронов активной зоны большого быстрого реактора (без учёта резонансной блокировки).

| Работа | $\langle k \rangle$ | Отношение |
|--|--|-----------|
| Соверби-Коньшин | 0,307 | 1,030 |
| БНАБ-70 | 0,300 | 1,007 |
| ENDF/B-III | 0,299 | 1,003 |
| ENDF/B-IV | 0,304 | 1,020 |
| Коньшин (1978г.) | 0,292 | 0,960 |
| Кононов-Подетаев (1977г.) (БНАБ-78) | $0,298 \pm \begin{matrix} 0,020^a) \\ 0,009^b) \end{matrix}$ | 1,000 |

Примечание: погрешность $\langle k \rangle$ получена:

- а) - с учётом корреляционной матрицы
- б) - в предположении диагональной корреляционной матрицы.

Полученные автором групповые константы по величине k и β_c для ^{239}Pu вошли составной частью в новую систему групповых констант БНАБ-78.

В диссертации обсуждается вопрос о структуре в величине k ^{239}Pu и ^{235}U в области энергий нейтронов 15 + 40 кэВ, впервые

обнаруженной автором, и недавно подтвержденной в работах западногерманских физиков в случае ^{235}U . В частности, сделано заключение о том, что структура в величине α несет большую физическую информацию о характере процесса деления, чем структура в самом сечении деления, так как на величину α не влияют флуктуации во входном канале. Основываясь на этом заключении, нами были проведены исследования деления ^{238}U нейтронами и было впервые экспериментально показано, что структура в сечении деления ^{238}U вблизи порога коррелирует со структурой в отношении сечений захвата и деления и не является следствием конкуренции с каналом неупругого рассеяния. Полученные результаты явились одним из первых экспериментальных указаний на существование в сечении деления ^{238}U подбарьерных резонансов вибрационного типа, связанных с возбуждением состояний во второй яме.

В пятой главе представлены результаты разработки новой постановки экспериментальных работ на импульсных электростатических генераторах по измерению сечений радиационного захвата нейтронов с высокой точностью, основанной на применении метода насыщенного резонанса. Приведены первые результаты абсолютных измерений сечений радиационного захвата нейтронов в ^{238}U . В этой же главе рассмотрен метод прямого измерения факторов резонансного самоэкранирования сечений захвата нейтронов в ^{238}U и приведены результаты, которые свидетельствуют о возможной недооценке этого эффекта в принятых в настоящее время системах констант. Эксперимент по прямому измерению факторов резонансного экранирования сечений захвата нами был выполнен впервые. Полученные данные нашли недавно дополнительное подтверждение в наших новых измерениях. Эти результаты могут пролить свет на оценок серьезных расхождений между данными по сечениям захвата для ^{238}U и интегральными экспериментами, которые имеют место в настоящее время.

Главный итог второй части диссертации состоит в получении новой экспериментальной информации по важнейшим ядерным данным - величине α , сечению захвата и фактору резонансной блокировки в основных топливно-сырьевых материалах реакторов на быстрых нейтронах.

Третья часть диссертации посвящена работам автора по экспериментальному и теоретическому исследованию сечений радиационного захвата быстрых нейтронов и получению из них средних резонансных параметров.

В шестой главе описан метод измерения, проводится его обоснование и приведены полученные экспериментальные данные по сечениям захвата нейтронов для большой группы изотопов в редкоземельной области. В качестве примера на рис.2 приведены полученные нами сечения радиационного захвата для изотопов эрбия.

В диссертации впервые в рамках единой методики получен обширный экспериментальный материал по сечениям радиационного захвата нейтронов для большого числа изотопов редкоземельных элементов (неодима, самария, европия, гадолиния, диспрозия, эрбия, иттербия), а также изотопов вольфрама и рения. Наиболее актуальной с практической точки зрения является новая информация о сечениях захвата быстрых нейтронов для продуктов деления, среди которых в настоящее время главное внимание отводится изотопам неодима и самария. Для большей части этих изотопов подробные экспериментальные данные нами были получены впервые. В результате наших исследований практически удовлетворены более 20 запросов на сечения захвата быстрых нейтронов для продуктов деления, опубликованных в сборниках WRENDA. Полученные нами экспериментальные данные были использованы при оценке и выработке рекомендованных ядерных данных для продуктов деления в ФЭИ, а также в ряде лабораторий за рубежом. Наши данные были включены в новую систему групповых констант для расчета быстрых реакторов БНАБ-78, а также были учтены при разработке ряда зарубежных систем групповых констант. В этом виде они имеют практическое применение при расчете ядерных реакторов.

В седьмой главе изложен метод анализа средних сечений захвата нейтронов в рамках статистической теории ядерных реакций с целью получения средних параметров нейтронных резонансов. Обсуждаются полученные в результате этого анализа новые данные по нейтронным и радиационным силовым функциям для s -, p - и d -нейтронов, производится сравнение с предсказаниями нейтронных силовых функций, даваемых различными вариантами оптической модели ядра.

На большом экспериментальном материале показано, что в области энергий нейтронов до 500 кэВ сечения радиационного захвата могут быть успешно описаны на основе статистической теории ядерных реакций. Основным механизмом реакции радиационного захвата нейтронов для исследованных ядер в этой области энергий является механизм образования компаунд-ядра, хотя не исключается для ряда ядер роль нестатистических эффектов.

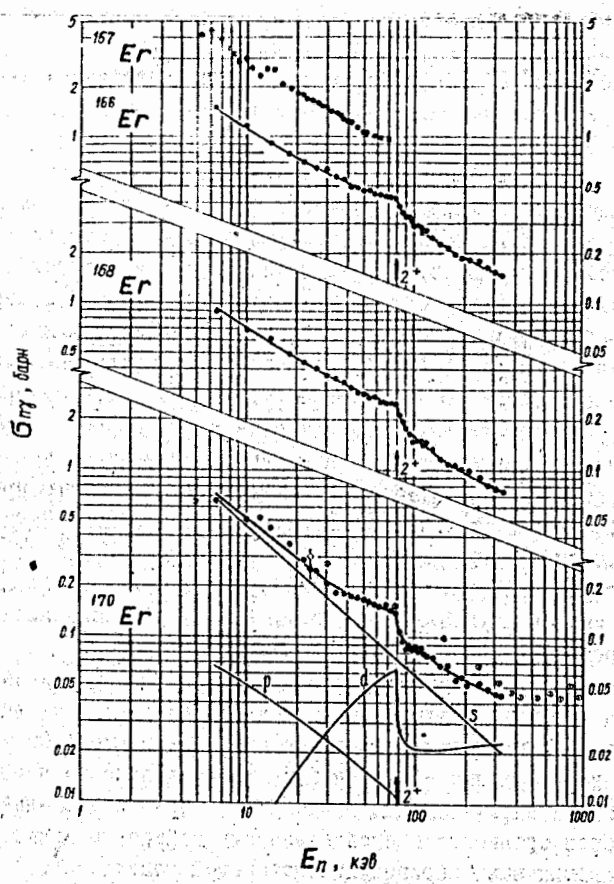


Рис. 2. Сечения радиационного захвата нейтронов для изотопов эрбия. Экспериментальные данные:
 ● - настоящая работа; ◆ - Маклин, ○ - Ступегия,
 ◆ - Хасен. — расчёт по оптимальным параметрам.

Предложен новый эффективный метод получения d -волновых нейтронных силовых функций, основанный на использовании особенностей в поведении сечений захвата вблизи порога неупругого рассеяния на уровне 2^+ для чётно-чётных ядер. Метод был использован для получения d -волновых нейтронных силовых функций 12 чётно-чётных ядер, для которых были получены подробные данные по сечениям захвата, и впервые было экспериментально показано, что эффект конкуренции с неупругим рассеянием играет большую роль в энергетической зависимости сечения захвата нейтронов в чётно-чётных ядрах при энергии 80 + 150 кэВ.

В рамках статистической теории ядерных реакций и с применением современных методов математической статистики проанализированы сечения радиационного захвата быстрых нейтронов и получены средние резонансные параметры для 23 изотопов редкоземельных элементов неодима, самария, европия, гадолиния, эрбия и ряда других ядер.

При анализе средние сечения описывались в терминах статистической теории ядерных реакций через средние значения параметров нейтронных резонансов:

$$\bar{\sigma}_{n\gamma}(E) = \pi \lambda^2 \sum_{\gamma} g^{\gamma} T_n^{j\pi} \frac{T_n^{j\pi}}{T_n^{j\pi} + T_{\gamma}^{j\pi} + T_{in}^{j\pi}} \cdot F \left(\frac{T_n^{j\pi}}{T_n^{j\pi}}, \frac{T_{in}^{j\pi'}}{T_n^{j\pi}} \right) \quad (I)$$

В этом выражении использованы общепринятые обозначения, а пропускности $T_n^{j\pi}$, $T_{in}^{j\pi}$, $T_{\gamma}^{j\pi}$ связаны с приведенными нейтронными S_{ℓ} и радиационными $S_{\ell}^{\gamma} = (\bar{\Gamma}_{\gamma} / \bar{\Gamma}_0)_{\ell}$ силовыми функциями следующими соотношениями:

$$T_n^{j\pi} = 2\pi \epsilon_{\ell\ell'}^0 \cdot S_{\ell}^{\gamma} v_{\ell}^2 \sqrt{E} \left(1 + \frac{\pi}{2} S_{\ell}^{\gamma} v_{\ell}^2 \sqrt{E} \right)^{-2}$$

$$T_{in}^{j\pi} = \sum_{\ell} \sum_{\ell'} \epsilon_{\ell\ell'}^{\kappa} T_n^{j\pi'} ; \quad T_{\gamma}^{j\pi} = 4\pi(2I+1) g^{\gamma} S_{\ell}^{\gamma} \cdot \xi(E)$$

Функция $\xi(E)$ учитывает энергетическую зависимость радиационной силовой функции, а фактор F - флуктуации нейтронных ширин в каналах упругого и неупругого рассеяния.

Задача получения силовых функций из средних сечений захвата сводилась к разложению кривой сечения на три компонента, соответствующие вкладу парциальных волн с $\ell = 0, 1, 2$, имеющие различную энергетическую зависимость, и подгонка теоретической кривой к экспериментальным данным, используя метод максимума правдоподобия. ИП - оценки силовых функций (\bar{F}), оптимальны в смысле наилучшего описания экспериментальных данных, находились минимизацией следующего квадратичного функционала:

$$S^2 = [\vec{\sigma}_{\text{эксп.}} - \vec{\sigma}_{\text{теор.}}]^T \cdot V^{-1} \cdot [\vec{\sigma}_{\text{эксп.}} - \vec{\sigma}_{\text{теор.}}] + (\vec{p}_0 - \vec{p}) \cdot W^{-1} \cdot (\vec{p}_0 - \vec{p}),$$

где $\vec{\sigma}_{\text{эксп.}}$ и $\vec{\sigma}_{\text{теор.}}$ - экспериментальное и теоретическое, рассчитанное по формуле (1), сечение захвата; \vec{p}_0 и W_0 - вектор априорных значений параметров (S_ℓ и $S_{\ell\ell}$ для $\ell=0,1,2$) и их ковариационная матрица; V - ковариационная матрица погрешностей экспериментальных данных по сечению захвата. Матрица V позволяет более строго определить экспериментальную кривую сечения и, следовательно, более полно извлечь содержащуюся в ней информацию о средних резонансных параметрах.

Погрешности силовых функций оценивались по следующей формуле:

$$W = \frac{S^2}{N} \cdot [H^T \cdot V^{-1} \cdot H + W_0^{-1}]^{-1},$$

где H - матрица коэффициентов чувствительности сечения к параметрам, N - число экспериментальных точек. Нondiagonalные члены этой матрицы отражают корреляционные свойства найденных Мп-оценок силовых функций. Полученные оптимальные параметры в пределах ошибок не зависят от их априорных значений и имеют небольшие ($\sim 0,3+0,4$) коэффициенты взаимной корреляции. Рассчитанные по этим параметрам кривые сечений всюду находятся в хорошем согласии с полученными экспериментальными данными.

В результате анализа средних сечений захвата в рамках статистической теории сделаны следующие основные выводы:

- для многих ядер радиационная силовая функция для S -нейтронов в несколько раз превышает отношение средней радиационной ширины к расстоянию между S -резонансами. Вероятной причиной этого является пропуск или неправильная идентификация резонансов. Сделан вывод о том, что для более корректного определения радиационной силовой функции в резонансной области необходимо развить метод, нечувствительный к этим эффектам.

- получено указание на то, что радиационные силовые функции для S -, p - и d -нейтронов не совпадают.

- получены новые данные по p -волновой нейтронной силовой функции, подтверждающие предсказание расчётов в методе сильной связи каналов о наличии максимума в S_1 при $A = 155 + 170$.

- впервые для изотопов редкоземельных элементов получена обширная информация о d -волновых нейтронных силовых функциях, которая подтверждает предсказания оптической модели о существовании $3d$ -резонанса размеров в области $A = 140 + 160$. Из полученных результатов сделан вывод о возможном расщеплении $3d$ -резонанса

на два пика, лежащих при $A = 145 + 155$ и $A = 165 + 170$. Полученные экспериментальные данные и результаты проведённых нами расчётов в методе сильной связи каналов представлены на рис.3.

- для широкого круга ядер получены новые данные о параметре плотности ядерных уровней α , подтверждающие наличие максимума в зависимости $\alpha(A)$ при $A \sim 150$, связанного с проявлением эффектов оболочечной структуры в плотности ядерных уровней.

- на ряде примеров продемонстрирована эффективность теоретического анализа сечений захвата нейтронов при получении оценочных ядерных данных для продуктов деления.

В восьмой главе рассмотрено применение данных по сечению радиационного захвата быстрых нейтронов для обоснования теории S -процесса звёздного нуклеосинтеза, который на основании полученных экспериментальных и расчётных данных по сечению захвата нейтронов был смоделирован на аналоговой вычислительной машине. Из сравнения результатов модельных расчётов для экранированных ядер с экспериментальными данными по распространённости нуклидов во Вселенной было достигнуто удовлетворительное согласие с моделью S -процесса и получены новые результаты по функции распределения нейтронных экспозиций. Наилучшее описание удалось получить с функцией распределения

$$p(\tau) = 2,3 \cdot 10^5 \exp(-\tau/0,22) + 1,6 \cdot 10^5 \exp(-\tau/0,059)$$

Этот результат был подтверждён в 1980 г. в Карлсруэ Кеппелером.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ.

I. Развито новое эффективное направление экспериментальных исследований нейтронных сечений и средних резонансных параметров для S -, p - и d -нейтронов на базе созданного спектрометра быстрых и резонансных нейтронов, в котором в качестве импульсного источника нейтронов использован электростатический генератор. Разработаны высокоэффективные универсальные экспериментальные методики измерения сечений захвата нейтронов, величины α , факторов резонансного самоэкранирования, полных нейтронных сечений и других характеристик взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами.

2. Получены новые экспериментальные данные по величине α ^{239}Pu и ^{235}U , проанализировано состояние экспериментальных данных по величине α ^{239}Pu , получены рекомендованные данные, групповые константы и их ковариационная матрица. Эти результаты вошли составной частью в систему констант БНАБ-78 и в таком виде были использованы при расчётах ядерных реакторов. Полученные эксперимен-

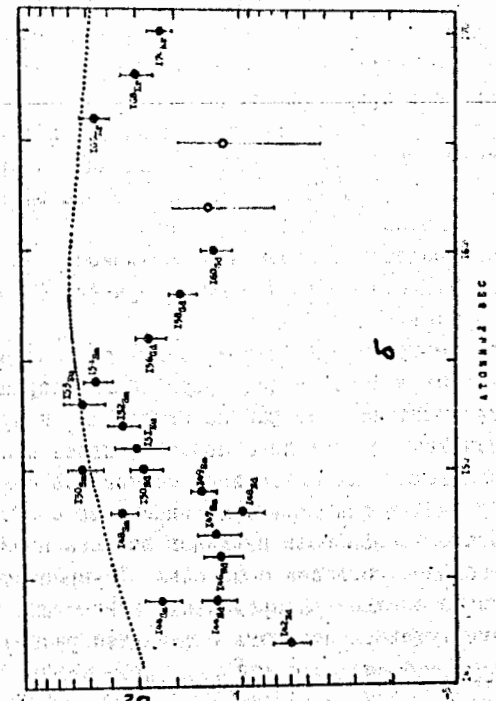
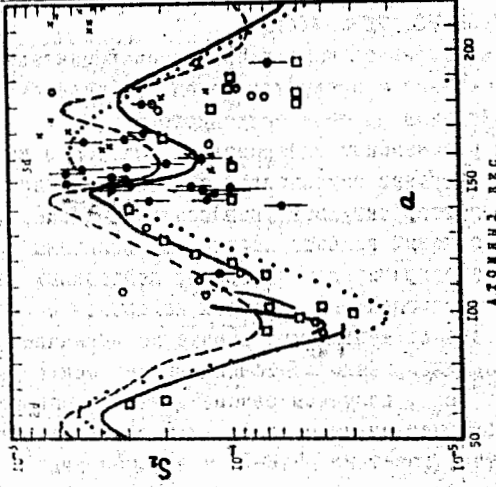


Рис. 3. Нейтронные силовые функции для d -нейтронов: а - в широкой области масс ядер, б - в области $A = 140 - 170$. Экспериментальные данные: \square - из анализа полных сечений, ϕ - из анализа средних сечений захвата, настоящая работа. Результаты расчётов: $\dots\dots$ - сферическая оптическая модель; $---$ - метод сильной связи каналов, потенциалы Туринского и Перри-Баке; x - расчёт в рамках полумикроскопического подхода В.Г. Соловьева.

тальные данные были использованы также в ряде других отечественных и зарубежных оценок и системах групповых констант.

3. Разработан новый абсолютный метод измерения сечений захвата быстрых нейтронов, основанный на использовании методики насыщенного резонанса, и проведён цикл измерений сечений захвата нейтронов в ^{238}U . Впервые проведены измерения факторов резонансного самоэкранирования сечений радиационного захвата нейтронов в ^{238}U .

4. В рамках единой экспериментальной методики получен обширный новый экспериментальный материал по сечениям радиационного захвата нейтронов в области энергий нейтронов от 5 кэВ до 380 кэВ для 42 изотопов и ряда элементов в широкой области атомных весов. Для большинства ядер подробные экспериментальные данные получены впервые. Среди исследованных ядер многие являются важными продуктами деления, получение ядерных данных для которых в настоящее время является актуальным. Полученные экспериментальные данные широко использовались в ФЭИ и реакторно-физических расчётах, являясь, в ряде случаев, основным экспериментальным материалом для составления групповых констант.

5. Предложен новый метод получения экспериментальных данных по d -волновым нейтронным силовым функциям.

6. Усовершенствован метод анализ экспериментальных данных по средним сечениям радиационного захвата нейтронов с целью получения средних резонансных параметров для s -, p - и d -нейтронов, основанный на применении статистической теории ядерных реакций и методов математической статистики. Получены новые экспериментальные данные по нейтронным и радиационным силовым функциям для трёх парциальных волн с $\ell = 0, 1, 2$ для 21 изотопа редкоземельных элементов.

7. Впервые получено экспериментальное подтверждение существования $3d$ -резонанса формы в d -волновой нейтронной силовой функции в области атомных весов $A = 140 + 180$ и указание на возможное его расщепление.

8. Получено экспериментальное подтверждение предсказаний расчётов в методе сильной связи каналов о наличии максимума в p -волновой нейтронной силовой функции в области $A = 155 + 170$.

9. Получено экспериментальное подтверждение наличия максимума в параметре плотности ядерных уровней в области атомных весов $A \sim 150$.

10. Сделан вывод о том, что для исследованных ядер основным механизмом реакции радиационного захвата нейтронов до энергий

~500 кэВ является статистический, в рамках которого удаётся хорошо описать всю совокупность полученных экспериментальных данных по сечениям радиационного захвата.

II. Проведенные экспериментальные работы и планируемое их развитие составляют перспективное направление ядерно-физических исследований, имеющее выход как на решение задач прикладного характера, выдвигаемых потребностями ядерной энергетики, так и фундаментальных, связанных с изучением структуры ядра и ядерных реакций.

Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на Международной конференции по исследованию структуры ядра с помощью нейтронов (Антверпен, 1966), на Конференциях по ядерным данным для реакторов (Париж, 1967 г.; Хельсинки 1970 г.), Всесоюзных конференциях по нейтронной физике (Киев, 1971, 1973, 1975, 1977г.г.), Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра (Москва 1966г., Харьков 1967г., Баку 1976г.), III Международной школе по нейтронной физике (Алушта, 1978г.).

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Кононов В.Н., Стависский Ю.Н. Сечения радиационного захвата быстрых нейтронов в рении и тантале. Атомная энергия. 1965, т.19, вып.5, с.457-458.
2. Dovbenko A.G., Kolenov V.E., Kononov V.N., Staviackii Yu.Ia. Radiative Capture Cross Sections for 30-170 keV Neutrons for Nuclei with $A \leq 100$. - In: Nuclear Structure Study with Neutrons. Ed. M.Nave de Mevergnien, Amsterdam, North Holland, 1966, p. 575.
3. Кононов В.Н., Стависский Ю.Н. и др. Сечения радиационного захвата нейтронов с энергией 30 + 170 кэВ. Ядерная физика, 1966, т.19, вып.2, с.282-291.
4. Кононов В.Н., Стависский Ю.Н., Чистозвонов С.Р., Шорин В.С. Сечения радиационного захвата быстрых нейтронов для изотопов Ag, Dy, W, Ta, Re - In: Nuclear Data for Reactors (Proceedings Conference on Nuclear Data for Reactors, Paris, 1966), v.1, Vienna, IAEA, 1967, p. 469-472.
5. Стависский Ю.Н., Абрамов А.И., Ваньков А.А., Кононов В.Н. и др. Радиационный захват быстрых нейтронов. М., Атомиздат, 1970.
6. Кононов В.Н. Метод определений силовых функций d -нейтронов для чётно-чётных ядер из сечений радиационного захвата. - Ядерная физика, 1967, т.5, вып.1, с.129-133.

7. Кононов В.Н., Мелёв А.А., Полетаев Е.Д., Шорин В.С. Сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий 5-70 кэВ для изотопов гадолиния и эрбия. - В кн.: Нейтронная физика. (Материалы 2-ой Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев 1973), ч.2, Обнинск, изд. ФЭИ, 1974, с.206-212; Ядерная физика, 1974, т.10, вып.1, с.5-10.
8. Шорин В.С., Кононов В.Н., Полетаев Е.Д. Сечения радиационного захвата нейтронов в области энергий 5-80 кэВ для изотопов Yb - Ядерная физика, 1974, т.20, вып.6, с.1092-1095.
9. Юрлов Б.Д., Кононов В.Н., Полетаев Е.Д. Сечения радиационного захвата быстрых нейтронов для изотопов самария и европия. - В кн.: Нейтронная физика. (Материалы 3-ей Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 1975), ч.3, М., изд. ЦНИИАтоминформ, 1976, с.190-194.
10. Кононов В.Н., Юрлов Б.Д., Полетаев Е.Д., Тимохов В.М. Сечения радиационного захвата быстрых нейтронов и средние резонансные параметры для чётно-чётных изотопов неодима, самария, гадолиния, эрбия. - В кн.: Нейтронная физика. (Материалы 4-ей Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 1977), ч.2, М., изд. ЦНИИАтоминформ, 1977, с.206-210.
11. Кононов В.Н., Юрлов Б.Д., Полетаев Е.Д., Тимохов В.М. Сечения захвата быстрых нейтронов для чётно-чётных изотопов неодима, самария, гадолиния и эрбия. - Ядерная физика, 1978, т.27, вып.1, с. 10-16.
12. Кононов В.Н., Мантуров Г.И., Николаев М.Н., Юрлов Б.Д. Оценка силовых функций по совокупности данных в области разрешённых и неразрешённых нейтронных резонансов. - В кн.: Тезисы докладов XXVI совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Баку, 1976. Л., изд. "Наука", 1976, с.208.
13. Кононов В.Н., Юрлов Б.Д., Полетаев Е.Д., Тимохов В.М. Сечения захвата нейтронов для индия, тантала, золота, самария и европия. - Ядерная физика, 1977, т.26, вып.5, с.947-955.
14. Кононов В.Н., Юрлов Б.Д. p - и d - волновые нейтронные силовые функции для ядер редкоземельной области. - В кн.: Нейтронная физика. (Материалы 4-ей Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 1977). Ч.2, М., ЦНИИАтоминформ, с.201-206.
15. Кононов В.Н. Некоторые результаты экспериментальных исследований взаимодействия s -, p - и d -нейтронов с атомными ядрами.

- В кн.: III Международная школа по нейтронной физике. (Алушта, 1978). ДЗ-11787, Дубна, изд. ОИЯИ, 1978, с.415-436.
16. Шорин В.С., Грибунин В.М., Кононов В.Н. и др. Синтез элементов в S-процессе. - Астрофизика, 1971, т.7, вып.3, с.489-500;
В кн.: Программа и тезисы докладов XIX ежегодного совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Ереван, 1969). Ч. II, ядерные реакции. Л., изд. "Наука", 1969, с.180-181.
17. Ставиский Ю.Я., Абрамов А.И., Вапьяков А.А., Кононов В.Н. и др. Экспериментальное исследование ядерных констант для быстрых реакторов. - В кн.: Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Симпозиум СЭВ, Обнинск, 1967. Сборник докладов, т.2, Обнинск, изд. ФЭИ, с.50-68.
18. Кононов В.Н., Полетаев Е.Д., Прокопец Ю.С., Ставиский Ю.Я. Метод измерения величины α . - В кн.: Нейтронная физика. (Материалы Всесоюзного совещания. Киев, 1971) ч. I, Киев, изд. "Наукова думка", 1972, с.301-308.
19. Кононов В.Н., Полетаев Е.Д., Прокопец Ю.С. и др. Абсолютные измерения величины α для ^{235}U и ^{239}Pu . - Атомная энергия, 1972, т.32, вып.1, с.85-87.
20. Кононов В.Н., Полетаев Е.Д., Юрлов Б.Д. Измерение величины альфа, сечения деления и сечения захвата для ^{235}U и ^{239}Pu в области энергий нейтронов 10 + 80 кэВ. - Атомная энергия, т.38, вып.2, с.82-86.
21. Кононов В.Н., Полетаев Е.Д., Прокопец Ю.С. и др. Абсолютные измерения α для ^{235}U и ^{239}Pu в области энергий нейтронов 10 кэВ - 1 МэВ. - В кн.: Труды ФЭИ. Под ред. В.А. Кузнецова, М., Атомиздат, 1974, с.48-57.
22. Куров А.М., Рыбов Ю.В., Кононов В.Н. и др. Измерения отношения сечений радиационного захвата и деления α для ^{235}U и ^{239}Pu в области энергий нейтронов ниже 30 кэВ. - In: Nuclear Data for Reactors, v.1, Vienna, IAEA, p. 345-355.
23. Кононов В.Н., Полетаев Е.Д. Анализ и оценка экспериментальных данных по величине α плутония-239. - В кн.: Нейтронная физика (Материалы 4-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 1977), ч.4, М., изд. ЦНИИатоминформ, 1977, с.75-79.
24. Kononov V.N., Poletaev E.D. Analysis and Evaluation of Experimental Data on the Value of Alpha for Plutonium-239. INDC(СССР)-108/U, August 1977, Vienna, 1977;

- Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерные константы. Вып.25, М., ЦНИИатоминформ, 1977, с.23-32.
25. Кононов В.Н., Полетаев Е.Д. Состояние экспериментальных данных по величине альфа ^{239}Pu . - Атомная энергия, 1978, т.45, вып.3, с.187-192.
26. Кононов В.Н., Полетаев Е.Д. Измерение полного сечения и резонансной самоэкранировки сечения захвата урана-238 в области энергий нейтронов 5 + 80 кэВ. - В кн.: Нейтронная физика. (Материалы 2-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 1973). Ч.2. Обнинск, изд. ФЭИ, 1974, с.199-205.
27. Кононов В.Н., Полетаев Е.Д. Экспериментальное определение факторов резонансной блокировки сечения захвата урана-238 в области энергий нейтронов 10-80 кэВ. - В кн.: Резонансное поглощение нейтронов. (Материалы Всесоюзного семинара по резонансному поглощению нейтронов, Москва, 1977). М., изд. ЦНИИатоминформ, 1978, с.185-189.
28. Володин В.И., Глотов А.И., Дудкин Н.И., Кононов В.И. и др. Излучение и эксплуатация электростатического ускорителя ЭГ-1 ФЭИ в импульсном режиме. - В кн.: Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. (Москва, 1970 г.). Т.1, М., изд. "Наука", 1972, с.113-114.
29. Кононов В.Н., Метлев А.А., Полетаев Е.Д., Володин В.И. Получение коротких импульсов ионного тока на ускорителе Ван-де-Граафа. - Приборы и техника эксперимента. 1973, ч.2, с.29-31.
30. Кононов В.Н., Боховко М.В., Казаков Л.Е., Полетаев Е.Д. Устройство для получения нейтронных вспышек в наносекундном и микросекундном диапазонах на ускорителе ЭГ-1 ФЭИ. - В кн.: Нейтронная физика. (Материалы 4-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике, Киев, 1977г.), ч.4, М., изд. ЦНИИатоминформ, 1977, с.243-246.
31. Полетаев Е.Д., Кононов В.Н., Боховко М.В. Электронная аппаратура эксперимента по измерению отношения сечений захвата и деления для плутония-239 и урана-235 в области быстрых нейтронов. Приборы и техника эксперимента, 1972, №2, с.55-56.
32. Кононов В.Н., Метлев А.А., Полетаев Е.Д., Прокопец Ю.С. Быстродействующая ионизационная камера деления. - Приборы и техника эксперимента. 1969, №6, с.51-55.

33. Кононов В.Н., Полетаев В.Д., Казаков Л.Е., Боховко М.В. Детекторы нейтронов с наносекундным временным разрешением. - Приборы и техника эксперимента, 1979, №3, с.77-81.
34. Кононов В.Н., Полетаев В.Д., Дайтан А. и др. Эффективность регистрации нейтронов литиевым стеклом NE-912 толщиной 0,95 см. - Препринт ЦИФИ-1979-72, Будапешт, изд. ЦИФИ, 1979.
35. Кононов В.Н., Полетаев В.Д., Орлов Б.Д. Абсолютный выход и спектр нейтронов из реакции ${}^7\text{Li}(\text{p}, \text{n}){}^7\text{Be}$. - Атомная энергия, 1977, т.43, вып.4, с.303-305.
36. Кононов В.Н., Стывисский Ю.Я., Степаненко В.Ф., Иванов В.И. О применении протонных ускорителей в качестве источников нейтронов для нейтронозахватной терапии. В кн.: Доклады второго Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Ленинград, 1975, т.2, Л., изд. НИИЭРА, 1976, с.60-68.
37. Жербин Е.А., Степаненко В.Ф., Иванов В.И., Кононов В.Н. и др. Физико-технические аспекты нейтронозахватной терапии с использованием протонных ускорителей. - В кн.: Использование нейтронов в медицине. материалы Всесоюзной конференции. Обнинск, изд. НИИМР АМН СССР, 1976, с.17-18.

ТБ-02699 от 11.07.80 г. Объем I уч.-изд.л. Тираж 150 экз.
Отпечатано на ротационной ФЭИ, г. Обнинск, июль 1980 г.
Заказ № 642... Бесплатно.