

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

П Р И М Е Н К О Г Е О Р Г И Й И В А Н О В И Ч

НЕИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНТЕНСИВНЫХ И СТАБИЛЬНЫХ
ПОТОКОВ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ
ЯДЕРНО - ФИЗИЧЕСКИХ И РАДИАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико - математических наук

К и е в - 1 9 9 3



00814320 (1)

Робота виконана в Київському університеті ім.Тараса Шевченка.

№ 27. 460

- Официальные оппоненты: - академик АН Украины,
доктор физико-математических наук,
профессор НЕМЕЦ О.Ф.
- член-корреспондент АН Украины,
доктор физико-математических наук,
профессор СТОРИЖКО В.Е.
- доктор физико-математических наук
СИКОРА Д.И.

Ведущая организация: Харьковский государственный университет

Защита состоится 17 июля 1993 года в 14¹⁵ часов
на заседании специализированного совета Д 016.03.01 при
Институте ядерных исследований АН Украины по адресу:
252028, г.Киев, проспект Науки, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ИЯИ АН Украины

Автореферат разослан 17 июля 1993 года.

Ученый секретарь
Специализированного совета
канд. физ. - мат. наук

В.Д.ЧЕСНОКОВА

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Актуальность проблемы. Все возрастающая потребность различных областей науки и производства в нейтронном излучении стимулирует исследование и разработку интенсивных, простых в обращении, управляемых и транспортбельных источников нейтронов. В ряду традиционных источников эв нейтронного излучения, таких как ядерные реакторы, ускорители заряженных частиц, радионуклидные, наилучшее удовлетворение указанных требований при решении многих задач реализуется в низковольтных генераторах нейтронов. Эти устройства представляют собой относительно малогабаритную разновидность ускорителей прямого действия, в которых специальная мишень под действием ускоренных ионов с энергией до 0,2 - 0,6 МэВ испускает нейтроны. Такие генераторы, использующие для получения нейтронов ядерные реакции $T(d,n)^4He$ и $D(d,n)^3He$, характеризуются возможностью изменения в широких пределах интенсивности нейтронного излучения, достаточно высокой его монохроматичностью, безопасностью установки в выключенном состоянии.

Генераторы нейтронов нашли широкое применение в таких областях, как нейтронная физика, физика реакторов, дефектоскопия, медицина, радиационное материаловедение, ядерная техника.

Однако, постановка новых задач в названных областях и появление новых сфер использования нейтронного излучения требуют новых выходных параметров приборов класса нейтронных генераторов, достижение которых либо невозможно, либо может осуществляться за счет значительного ухудшения других важных характеристик - ресурса мишени и стабильности источника нейтронов.

Улучшение выходных характеристик генераторов нейтронов на порядок и выше и повышение стабильности их работы может сделать их по ряду параметров вполне конкурентноспособными с источниками, находящимися на более высокой иерархической

ступени, вплоть до мощных ускорителей (циклотроны, линейные ускорители электронов), реакторов низкой мощности.

Реализация указанных параметров в приборах класса генератор нейтронов требует: проведения комплексного исследования физических процессов, протекающих в твердотельных мишенях, изготовленных из различных материалов, при работе и хранении их, использования нетрадиционных новых способов эффективного управления ресурсом нейтронообразующей мишени, исследования, разработки и создания мощных источников ионов дейтерия (трития) и устройств их ускорения до энергии в несколько сотен кэВ, разработки методов и средств для метрологического обеспечения нейтронных измерений.

Необходимость комплексных исследований с целью получения интенсивных и стабильных во времени пучков 14 МэВ нейтронов, проработка совокупности физических вопросов, направленных на создание эффективных излучателей нейтронов, новые методики измерения физических параметров генераторов быстрых нейтронов, новые физические идеи определили направленность и содержание диссертационной работы, которая выполнялась в соответствии с планами и научными программами Государственного Комитета Украины по народному образованию, Академии Наук Украины, Государственного комитета СССР по науке и технике, Государственного Комитета СССР по народному образованию, Минатомэнергопрома СССР.

Цель работы состояла в исследовании физических процессов, определяющих работу устройств для генерации интенсивного и стабильного во времени нейтронного излучения, установлении основных физических закономерностей сорбции и десорбции изотопов водорода (дейтерия, трития) в твердотельных структурах нейтронообразующих мишеней генераторов нейтронов, создании и исследовании методов и приемов, обеспечивающих стабильность нейтронного излучения при высокой интенсивности последнего, методик измерения в широком диапазоне основных параметров источников нейтронов, а также в практической реализации результатов физических

исследований в виде макетов генераторов и эксплуатационных приборов.

Метод исследования включал:

а) Экспериментальный анализ выходных мишеней устройств, ионных пучков и энергетического обеспечения генераторов нейтронов на основе схем каскадного умножения напряжения с использованием электродинамических, нейтронной и масс-спектрометрической методик исследования, экспериментальный анализ поля термоядерных нейтронов на основе методов активации, протонов отдачи, предварительного замедления, сопутствующих частиц данной реакции.

б) Теоретический анализ физических свойств процессов взаимодействия быстрых ионов дейтерия и трития с поверхностью твердотельной мишени с использованием аппарата численного решения на ЭВМ дифференциальных уравнений.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается совпадением основных выводов эксперимента и теории, а также практикой разработок и испытаний новых источников термоядерных нейтронов, базирующихся на данных проведенных исследований.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Аналитически решена задача о термодиффузионном перераспределении дейтерия и трития в многослойной мишени генератора нейтронов, а также о потоке быстрых нейтронов проанализированы различные предельные случаи.

2. Предложена и реализована методика экспериментального определения коэффициента и скорости десорбции дейтерия и трития в условиях облучения по результату измерения потока нейтронов в зависимости от времени имплантации.

3. Предложен, исследован и реализован метод увеличения ресурса работы металл-тритиевой мишени путем распыления ее поверхности тяжелыми ионами в режимах смешанного "дейтерий-тяжелый ион" пучка и периодического распыления поверхности мишени тяжелыми ионами.

4. Исследованы и определены основные характеристики наивысших мишеней из различных материалов. Показана их

пригодность для генераторов быстрых нейтронов.

5. Исследованы, разработаны и изготовлены малогабаритные высоковольтные источники постоянного тока в сжатом газе, что позволило разрешить проблему создания малогабаритного, транспортабельного генератора нейтронов.

6. По результатам проведенных исследований разработан и реализован в виде действующих приборов высокоточный ускорительный комплекс специального электрофизического оборудования для проведения нейтронно-активационного определения ряда элементов и проведения ионнолучевой сварки металлов.

7. Исследованы и определены основные режимы работы генератора нейтронов на смешанном тритий-дейтериевом пучке и периодической подпитке мишени тритием. Разработан и реализован в виде действующего прибора генератор нейтронов, имеющий замкнутую систему откачки, что позволило применить тритиевый пучок для пополнения убыли трития в мишени.

8. Разработан и реализован комплекс образцовых средств измерений для метрологического обеспечения нейтронных измерений по методу сопутствующих частиц и нейтронно-активационному методу в соответствии с ГОСТ 8.105-80 и проведена его Государственная метрологическая аттестация.

Практическая ценность работы состоит в том, что ее результаты составили физическую основу для создания серии высокоинтенсивных и относительно стабильных генераторов нейтронов нового поколения.

Разработанные опытные образцы генераторов нейтронов успешно апробированы в различных организациях Советского Союза (бывшего) при решении задач нейтронной физики, моделировании нейтронных полей термоядерных реакторов, нейтронно-активационного элементного анализа, изучении воздействия нейтронных полей на специальные конструкционные материалы и полупроводниковые приборы.

Результаты диссертации включены в курс лекций "Источники нейтронов", читаемых в Киевском университете им.

Тараса Шевченко, монографию "Вопросы физики быстрых нейтронов. Мишени для получения нейтронов", а также в учебное пособие "Источники нейтронов".

Положения выносимые на защиту:

1. Результаты исследований, физически обосновывающие реализацию эффективного использования набивных мишеней для прибора класса генератор нейтронов и включающие:

- определение закономерности внедрения быстрых ионов трития в различные металлы и пленки на металлических подложках;
- выявление возможности сохранения практически постоянным выхода термоядерных нейтронов при самопроизвольной десорбции трития;
- определение выхода нейтронов при различных температурах набивных мишеней.

2. Результаты теоретических исследований термодиффузионного перераспределения концентрации имплантированных дейтерия и трития в многослойной нейтронообразующей мишени генератора нейтронов.

3. Результаты теоретических исследований по определению потока быстрых нейтронов с учетом термодиффузионного перераспределения концентрации изотопов водорода в многослойной структуре набивной мишени генератора нейтронов.

4. Реализация способов стабилизации потока термоядерных нейтронов во времени из нейтронообразующих мишеней генераторов нейтронов:

- путем использования смешанного тритий-дейтериевого пучка;
- путем распыления поверхности нейтронообразующей мишени тяжелыми ионами;
- путем использования многослойной конструкции мишени.

5. Результаты исследований режимов работы генератора нейтронов на смешанном тритий-дейтериевом пучке и на его основе реализация первого источника нейтронов с постоянным во времени потоком термоядерных нейтронов.

6. Результаты расчета, моделирования, макетирования, практической реализации и исследования физико-технических характеристик генератора нейтронов с потоком $(5 \pm 10) \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$.

7. Разработка и создание малогабаритных генераторов в сжатом газе с размещением элементов схемы умножения на электродах ускорительной трубки.

8. Реализация комплекса образцовых средств измерений в соответствии с ГОСТ 8.106-80 для метрологического обеспечения нейтронных измерений и его аттестация.

9. Реализация комплекса аппаратуры на основе сверхслаботочного ускорителя для градуировки и калибровки детекторов заряженных частиц, комплекса аппаратуры для нейтронно-активационного анализа на основе высокопоточного генератора нейтронов, а также комплекса аппаратуры для ионно-лучевой сварки на основе высокопоточного ускорителя ионов.

Апробация работы была осуществлена в процессе практического использования генераторов нейтронов и ускорителей в КГУ, ХГУ, МИФИ, ИФ АН Украины, ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского, ИИИ АН СССР, ВГУ, ИФ ГрССР, ИФ ЛССР, ИАН СССР, БГУ, Гиредмете, НИИХП, НИИПЭ "Пульсар", Институте литья АН Украины, Институте физики металлов АН Украины и ряде других организаций.

Основные результаты диссертации докладывались на: Всесоюзной научно-технической конференции "20 лет производства и применения изотопов и источников ядерных излучений в народном хозяйстве СССР" (г. Минск, 1968г.); 2 и 3 Всесоюзном совещании по активационному анализу (Ташкент, 1968г., 1972г.); 22, 26, 36 Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (1972, 1976, 1986г.); Всесоюзном совещании по ускорителям низких и средних энергий (Киев, 1981); 2 и 3 Всесоюзных научно-технических совещаниях "Вопросы разработки и применения портативных генераторов нейтронов". (Москва, 1987; Киев, 1988); I Всесоюзном совещании "Ядерно-физические методы анализа в контроле окружающей среды" (Ташкент, 1983); Всесоюзном совещании по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях (Москва, 1990); 5 Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядернотехнических установок (Протвино, 1989); 4 и 6 Всесоюзных конференциях по

нейтронной физике (Киев, 1977, 1983); I Международной конференции по нейтронной физике (Киев, 1987); Международной конференции по нейтронной физике (Дебрецен, ВНР, 1978); Международной конференции "Источники нейтронов" (Ленинград, 1986); V Международном симпозиуме по радиационной физике (Дубровник, Югославия, 1991); Международной конференции "Структурно-динамические процессы в неупорядоченных средах" (Самарканд, 1992).

Компактный генератор в сжатом газе демонстрировался на ВДНХ СССР и отмечен золотой медалью выставки. Год результатов физических исследований и разработок нейтронных излучателей включены в работу, удостоенную Государственной премии Украины за 1986г, в области науки и техники.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 67 научных публикациях, в том числе в центральных изданиях: "Атомная энергия", "Приборы и техника эксперимента", "Известия вузов СССР", "Вопросы атомной науки и техники", "Украинский физический журнал", "Известия АН СССР" и Трудах Всесоюзных и Международных конференций.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы. Общий объем диссертации 363 страницы, включая 85 рисунков, 24 таблицы и списка литературы из 290 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

В первой главе диссертации на основе анализа современного состояния разработок источников 14 MeV нейтронов различного типа и тенденций их развития, а также собственных исследований, обосновывается важность и всевозрастающая потребность в излучателях класса генераторов нейтронов. В существующей иерархии источников нейтронов по величине интенсивности их излучения (радионуклидные источники, ускорители заряженных частиц, реакторы) излучатели класса генераторов нейтронов становятся все более предпочтительными для решения многих задач ввиду высокой

радиационной безопасности в выключенном состоянии, сравнительной простоты использования, низкой энергетической "цены" нейтрона, обеспечивая при этом поток нейтронов на уровне $10^{10} - 10^{12} \text{ с}^{-1}$ и выше.

Одной из главных проблем при получении нейтронных потоков $\geq 10^{10} \text{ с}^{-1}$ является сохранение стабильности выхода нейтронов в течении длительных интервалов времени (6-8 часов). Вместе с тем, время жизни стационарной металло-тритиевой мишени очень мало.

Возможность создания эффективного и стабильного во времени источника 14 МэВ нейтронов определяется пониманием физических процессов происходящих в мишенях при бомбардировке их дейтронами.

На основании анализа опубликованных работ и собственных исследований нами осуществлена систематизация способов повышения выхода нейтронов и стабилизации его во времени. (рис.1). [1,2]

При исследовании работы генератора нейтронов в режиме периодической подпитки мишени тритием показано, что выход 14 МэВ нейтронов максимален при замещении дейтерия тритием в резонансной области взаимодействия дейтронов атомарного компонента пучка с ядрами трития (рис.2). Снижение концентрации дейтерия и увеличение концентрации трития происходит в областях, соответствующих концам пробегов атомарных и компоненто молекулярных ионов трития. [23,24]

Независимые исследования распределения концентрации трития и дейтерия по глубине мишени, проведенные в лабораториях Ливермора (США, Дэвис) и ФИАН России (Барит И.Я., Кузьмин Л.Е., Макаров С.А., Проelman И.М.) показали, что падение выхода нейтронов с энергией 14 МэВ происходит в результате снижения концентрации трития и возрастания концентрации дейтерия в областях, соответствующих концам пробегов компоненто молекулярных ионов дейтерия. При этом обедненный тритием слой приходится на резонансную область взаимодействия дейтронов атомарного компонента пучка с ядрами трития. Следовательно, падающий на мишень пучок

дейтронов приводит к непрерывному обеднению мишени тритием.

Одним из путей решения проблемы получения интенсивного, стабильного во времени потока 14 MeV нейтронов является применение быстрых ионов, которые, внедряясь, увеличивают ресурс мишени. Например, использование смешанных тритий-дейтериевых пучков, периодической подпитки мишени тритием с целью пополнения убыли из нее последнего или тяжелых ионов, производящих распыление поверхности мишени и перемещающих таким образом обедненный тритием слой мишени вглубь. В этом случае необязательно применять твердотельные тритий-содержащие мишени, полученные путем сорбции, целесообразнее, по-видимому, применять набивные мишени. [3,5,11,17-20]

Во второй главе проведено теоретическое исследование внедрения ионов изотопов водорода в многослойные мишени, изучено диффузионное перераспределение концентраций имплантированных ионов изотопов водорода в однородные и многослойные твердотельные структуры, рассчитан поток нейтронов из набивной мишени.

При теоретическом исследовании влияния материала активного слоя и подложки мишени на выход нейтронов используется диффузионная модель. Получены аналитические выражения, описывающие концентрацию имплантированных ионов в активном слое и подложке мишени в зависимости от таких параметров как коэффициент диффузии в различных слоях мишени, скорость десорбции их из поверхности мишени в вакуумную систему, а также толщине активного слоя мишени, энергии пучка ионов. Аналитические формулы удобны для быстрых численных расчетов концентрации изотопов водорода для достаточно длительного времени облучения мишеней ионами в случае, если все основные перечисленные выше физические параметры известны.

В случае, если эти параметры неизвестны, предложен метод экспериментального определения этих коэффициентов.

Предлагаемый метод может применяться для любых металлов и, в частности, позволяет получать сведения о коэффициентах диффузии и скорости десорбции в вакуум для малорастворяющихся изотопов водорода металлов, таких как медь, алюминий, молиб-

ден, используемых как подложки мишенной.

Метод извлечения информации о коэффициентах диффузии и скорости десорбции дейтерия из металлов, находящихся под облучением, основан на измерении выхода продуктов ядерной реакции, зависящего от коэффициента диффузии и скорости десорбции как от параметров, и на его теоретическом моделировании. Далее решается задача идентификации параметров, от которых зависит экспериментальная кривая, с параметрами теоретической модели.

Для идентификации построена теоретическая модель определения концентрации внедряемых в мишень дейтронов как для толстых мишеней так и для мишеней нанесенных на подложку.

Для случая толстой мишени она приводит к выражению для потока D-D нейтронов [12]:

$$N(t) = \alpha \sum_{n=1}^{\infty} [B_{2n}(q) + \frac{1}{\gamma} (B_{2n+1}(q))] \text{Sp}(\theta),$$

$$\alpha = \frac{j^2 R^2 \sigma_0 S F}{Dq} \quad \theta = \frac{D}{R^2} t$$

где j - плотность тока дейтронов, R - средний проективный пробег дейтрона, S - сечение пучка, D - коэффициент диффузии дейтрона в мишени, $q = A/E_0^{1/2}$, $A = 44,4 \text{ КэВ}^{1/2}$, E_0 - начальная энергия дейтронов, $\text{Sp}(\theta)$ - функция зависящая от концентрации внедренных ионов и определяемая развитием процесса диффузии от времени. Члены ряда

$$B_n(q) = \frac{e^{-q}}{\pi} \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{q}{v}\right) e^{-v} dv$$

очень быстро сходятся. На рис.3 представлена рассчитанная на ЭВМ скорость счета нейтронов из реакции D-D в зависимости от времени наивки мишени из меди. Следует отметить хорошее согласие с экспериментальными данными (точки на рис.3 - экспериментальные результаты). На этом же рисунке приведен выход D-D нейтронов для мишени, толщина которой L несколько больше пробега дейтронов R ($L = 1,01R$) с подложками из различных материалов. Условия были выбраны такие же, как и для сплошной медной мишени. Из рис.3 видно, что, выбрав

энергию пучка, при которой мишень простреливается почти до подложки, можно увеличить выход нейтронов по сравнению с толстой мишенью, если выбрать подложку, коэффициент диффузии в которой меньше, чем в активном слое мишени. [12]

Следует отметить, что выражение для потока нейтронов, а, следовательно, и выход нейтронов в зависимости от времени наработки мишени несколько видоизменится при наличии страгглинга, т.е. статистического разброса потерь энергии и пробегов частиц в веществе. В диссертации показано, что наличие страгглинга приводит к увеличению уровня насыщения нейтронного выхода и большей скорости приближения к уровню насыщения. Качественно подобным образом на выход нейтронов влияет некохроматичность пучка дейтронов.

Деградация мишени, а, следовательно, и падение выхода T-D нейтронов происходит из-за вымывания трития в конце пробега компонентов молекулярных ионов дейтерия. Область вымывания по порядку величины равна страгглингу ионов дейтерия и практически неподвижна относительно поверхности мишени (для ионов изотопов водорода с энергией в несколько сотен кэВ коэффициент распыления значительно меньше единицы). При бомбардировке мишени тяжелыми ионами происходит заметное распыление материала мишени в широком диапазоне энергий. Это означает, что ионы порций молекулярных (атомарных) дейтронов внедряются с новой поверхности и положение максимума распределения отдельных порций не совпадает, профиль распределения их искажается. Обедненный тритием слой мишени будет перемещаться вглубь с такой скоростью, которая обеспечит квазистабильный поток нейтронов и как следствие - отсутствие глубокого вымывания трития. С этой целью предлагается идея использования пучка тяжелых ионов, способного распылять поверхность мишени. [67] Схематически процесс показан на рис. 4.

Начальное положение поверхности - линия "а". За время, пока распыляющий поток тяжелых ионов "передвинет" поверхность к отметке "б" - пучок дейтерия уменьшит концентрацию трития $C(x, t)$ в соответствии с $C(x, t) = C_0 \exp(\phi(x) \cdot t)$.

пунктирная кривая 1. (t - время, $\phi(x)$ - скорость убывания трития в пересчете на единичную его концентрацию). Новая порция дейтерия внедряется с поверхности "б" и распределяется по тому же закону (пунктирная кривая 2). За это время поверхность перемещается в положение "в" и все повторяется.

В результате получается однородная и мало отличающаяся от начальной пространственная зависимость концентрации трития (сплошная линия рис.4) - мишень генератора работает без деградации.

Поиск оптимума распыления поверхности мишени предполагает формулировку соответствующих уравнений динамики концентрации трития в мишени при распылении, решение этих уравнений и выбор условий работы генератора нейтронов (соотношение между потоками и энергиями дейтерия и тяжелых ионов и т.д.).

Режим работы генератора нейтронов может быть таким, что:

1. Газ, производящий распыление мишени подается в основной источник ионов одновременно с дейтерием. Тогда в мишени наряду с генерацией T-D нейтронов идет распыление поверхности материала мишени.

2. Газ, производящий распыление мишени и дейтерий подаются в разрядную камеру источника ионов поочередно. Когда подается дейтерий, то генерируются нейтроны из T-D реакции, поток которых со временем падает из-за вымывания трития в конце пробега молекулярных ионов дейтерия. При достижении потока нейтронов определенного, наперед заданного уровня, подача дейтерия в камеру источника ионов прекращается, а подается только тяжелый газ, который распыляет поверхность мишени, смещая или ликвидируя полностью область с вымытым дейтерием тритием. Нейтроны в этот период работы генератора не генерируются.

3. Имеется дополнительный источник ионов, который может находиться под потенциалом равным или ниже основного, обеспечивая бомбардировку мишени по одному из описанных выше

режимов.

В третьей главе диссертации приведены результаты экспериментального исследования кинетики накопления и обратного выделения имплантированных изотопов водорода в металлы.

Для исследования процессов внедрения ионов трития в различные материалы была применена методика, основанная на регистрации нейтронов, получающихся в реакции $T(t, 2n)$. Для регистрации нейтронов применялись сцинтилляционные счетчики.

Результаты исследований мишени из титана, хрома, меди, циркония, ниобия и урана представлены на рис.5 "а" а для мишеней из скандия, иттрия, неодима, празеодима и эрбия на рис. 5 "б". [17-20] Мишени набились ионами трития с током 100 мкА при ускоряющем напряжении 120 кВ. Из рис.5 видно, что вначале наблюдается линейное увеличение выхода нейтронов со временем. Этот временной интервал различен для разных материалов, для ниобия он равен 2 минутам, для урана 20 минутам. Линейный ход этого участка кривой свидетельствует о том, что в начале облучения тритий из мишени практически не выделяется, насыщение, т.е. достижение постоянного выхода нейтронов, достигается у разных металлов за разное время (при одинаковой плотности тока). Наибольший выход нейтронов наблюдается на мишенях из титана, циркония и металлов групп редких земель, т.е. на мишенях из металлов, образующих с изотопами водорода прочные химические связи.

Временной ход насыщения металлических мишеней можно удовлетворительно объяснять, считая, что распределение трития в мишени удовлетворяет уравнению диффузии.

Внедрение быстрых тритонов в металлическую титановую мишень и титановую мишень, напыленную на молибденовую подложку, происходит по разному. [22] Титан, напыленный на молибденовую подложку, насыщается значительно быстрее, чем чистый титан (рис.6), так как в пластинке титана бомбардирующие тритоны проникают в металл и диффундируют как вглубь металла, так и к его поверхности. Диффузия тритонов на глубину, превышающую глубину пробега их в титане,

приводит к обеднению поверхностных слоев тритием и к уменьшению выхода нейтронов. Для предотвращения диффузии тритонов из зоны реакции вглубь металла титан следует наносить в виде тонкого слоя на подложку из металла с малой растворимостью изотопов водорода, например, молибден.

В соответствии с диффузионной моделью данные экспериментального исследования достаточно неплохо описываются следующим уравнением:

$$\frac{dc}{dt} = Sj - SD\gamma' - 2j\sigma c$$

где dc/dt - скорость накопления тритонов (дейтронов) в активном слое мишени, S - сечение пучка, j - скорость поступления тритонов (дейтронов) на единицу площади мишени, γ' - коэффициент, зависящий от геометрии мишени, σ - сечение ядерной реакции, C - концентрация тритонов (дейтронов). Тогда логарифм разности скорости счета нейтронов при насыщении мишени $N_{\infty} = j\sigma C_{\infty}$ и в любой другой момент времени $N = Cj\sigma$ от времени бомбардировки t зависит линейно:

$$\ln(N_{\infty} - N) = \ln N - (2j\sigma + SD\gamma')t$$

На рис.7 построена такая зависимость для мишеней из титана, меди и урана. Как видно экспериментальные и расчетные результаты хорошо совпадают.

Были проведены измерения, показывающие изменения содержания трития при нагреве наивысших мишеней. [16] Температура мишени измерялась термопарой. Бомбардировка мишени проводилась пучком ионов дейтерия с силой тока 5 мкА, что исключало практически падение выхода за счет падающего на мишень дейтериевого пучка за время измерения.

Выход $T(d,n)$ нейтронов при этом позволил судить о концентрации трития в мишени. Результаты измерений выхода $T(d,n)$ нейтронов в зависимости от температуры мишеней из титана, циркония, ниобия и меди приведены на рис.8 "а". Из циркониевой и медной мишени выход $T(d,n)$ нейтронов и, следовательно, количество трития в мишенях при температуре 400-500°C уменьшается в 3-4 раза по сравнению с температурой 25°C. Содержание трития в мишенях из скандия, иттрия,

празеодима, неодима и эрбия при температуре 400°C для всех исследованных металлов составляет, примерно 65-70% от начального. Для тритий-скандиевой мишени даже при температуре 500°C содержание трития составляет более 50% от начального, что значительно больше чем для тритий-циркониевой и тритий-титановой мишеней (рис.8 "б").

Некоторое уменьшение количества трития, внедренного в материал мишени, наблюдается при перерывах в облучении на несколько часов, что связано как с самопроизвольной десорбцией трития, внедренного в поверхностный слой, так и с диффузией его вглубь металла. Так, перерыв в облучении медной и титановой мишеней на пять часов уменьшает выход нейтронов из медной мишени на 10%, а из титановой на 6%. [16]

На мишенях, полученных при бомбардировке металлической поверхности пучком тритонов, были измерены выходы нейтронов из T(d,n) реакции. Результат представлен в табл. I. [20],

Таблица I.

| Материал мишени | Выход нейтронов - (нейтр./мк кулон) 10 ⁷ |
|--------------------|--|
| Скандий (молибден) | 6,5 |
| Титан (молибден)* | 10 |
| Титан (молибден)** | 4,5 |
| Титан (диск) | 1,8 |
| Иттрий (молибден) | 4,5 |
| Медь (медь) | 4,5 |
| Медь | 2,7 |
| Ниобий | 0,4 |
| Празеодим | 5,5 |
| Неодим (молибден) | 4,5 |
| Эрбий (молибден) | 4,5 |
| Тантал | 1,5 |

*Набивная мишень
**Сорбированная мишень

Таким образом, исследования показали, что набивные мишени по такому важному параметру, как выход нейтронов, в ряде случаев превосходят обычно используемые сорбированные мишени, а наиболее перспективными металлами для мишеней, работающих в жестких температурных режимах, являются скандий и эрбий, так как их тритиды выдерживают более высокие температуры без снижения выхода нейтронов по сравнению с

тридами титана и циркония.

Четвертая глава посвящена исследованию режимов работы генератора нейтронов, работающего на смешанных тритий - дейтериевых пучках.

Подпитка мишени тритием повышает качество мишени. Обнаружено, что подпиткой новых мишеней можно повысить выход нейтронов. Кроме того, подпитка мишени имеет преимущество перед заменой мишени и в экономическом отношении.

При работе на смешанных тритий-дейтериевых пучках в источнике ионов в результате ионизации образуются ионы D^+ , T^+ , D_2^+ , T_2^+ , DT^+ , TD^+ , а если имеются остатки водорода, то еще и ионы HD^+ , HT^+ , H^+ , H_2^+ .

Если доля трития по сравнению с долей других компонентов ионного пучка мала, а концентрация оставшихся изотопов водорода $C(x)$ по глубине мишени величина постоянная, то плотность потока Φ 14 - МэВ нейтронов с поверхности бомбардируемого участка можно представить:

$$\Phi = C \int_0^{E_0} \sigma(E) \left[-\frac{dE}{dx} \right]^{-1} dE \approx \frac{1}{e} CB$$

Видно, что величина B , а следовательно, и плотность потока нейтронов, зависит от энергии пучка ионов, бомбардирующих мишень, и тормозной способности мишени:

$$\begin{aligned} \Phi = & \sum_{k=1}^3 K f_k \cdot [b_{dt} \left(\frac{E_0}{K} \right) + b_{td} \left(\frac{E_0}{K} \right)] + f_{dT} \cdot [b_{dT}(0,4E_0) + \\ & + b_{dT}(0,6E_0)] + f_{d_2T} \cdot [2 \cdot b_{dT} \left(\frac{2E_0}{K} \right) + b_{td} \left(\frac{3}{7} E_0 \right) + \\ & + f_{dT_2} [b_{dT} \left(\frac{E_0}{4} \right) + 2b_{td} \left(\frac{3}{8} E_0 \right)] \end{aligned}$$

где $f_{dT} + f_{dT_2} + f_{d_2T} + 2 \sum_{k=1}^3 f_k = 1$

" K " принимает значение 1, 2, 3 соответственно для D^+ , D_2^+ , D^+ компонентов; f_k - доля K - компонента.

$$b_{kl} = \int_0^{E_0} C_{kl}(E) \left(-\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

где k, l - индекс налетающей частицы и ядра мишени

соответственно.

С помощью смешанных пучков удается держать поток нейтронов постоянным; что весьма важно для ядерно-физических исследований и промышленного применения.

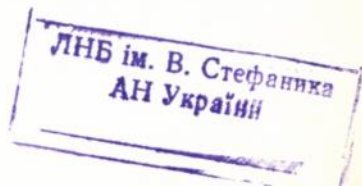
Результаты исследования работы генератора нейтронов на смешанных тритий-дейтериевых пучках с использованием титановой мишени толщиной 2 мг/см^2 приведены на рис.9. Измерения проводились на смеси трития и дейтерия в отношении 1:1. Кривая 1 снималась при токе 1 мА, кривая 3 при токе 0,5 мА, ускоряющее напряжение в обоих случаях равнялось 150 кВ, кривая 2 снималась на смеси трития и дейтерия в отношении 2:3 при токе 1 мА. Видно, что при падении на мишень около 0,4 кулона смешанного тритий-дейтериевого пучка устанавливается стабильный во времени выход нейтронов с энергией 14 МэВ, что связано с достижением равновесия концентраций трития и дейтерия в мишени.

Исследования показали, что поток 14 МэВ нейтронов пропорционален току смешанного тритий-дейтериевого пучка (концентрация тритий-дейтерий 1:1), а величина выхода нейтронов на микрокулон тока практически не зависит от значения тока смешанного пучка.

При работе генератора на смешанных тритий-дейтериевых пучках получен выход 14 МэВ нейтронов $1,8 \cdot 10^7$ микрокулон⁻¹.

При работе генератора нейтронов в режиме периодической подпитки убыль трития в мишени пополняется путем замены дейтронного пучка, бомбардирующего мишень, тритиевым пучком. С помощью этого способа можно получить выход нейтронов близкий к максимальному $V_{от}$. Выход относится к начальному моменту бомбардировки мишени пучком дейтронов. При постоянной энергии дейтронного пучка изменение выхода 14 МэВ нейтронов зависит только от изменения концентрации трития в мишени.

Единичный цикл подпитки состоит из бомбардировки мишени пучком дейтронов (с зарядом Q_d) и следующей за этим - подпитки мишени тритием (с зарядом Q_T). В случае, если произошло большое число циклов ($n \rightarrow \infty$) подпитки, выражение для



концентрации трития в мишени:

$$\bar{Q}_{\text{цп}}^{\text{т}} = [1 - \exp(-\alpha_{\text{т}}Q_{\text{т}})] \cdot (1 - \exp[-\alpha_{\text{д}}Q_{\text{д}} + \alpha_{\text{т}}Q_{\text{т}}])^{-1}$$

где α - постоянный коэффициент, определяемый свойствами материала мишени и пучка.

В режиме периодической подпитки мишени тритием наступает насыщение, при котором выход T-D нейтронов в начале каждого цикла постоянен, так как при всех режимах подпитки мишени достигается постоянство концентрации трития. Выход T-D нейтронов увеличивается с ростом отношения $Q_{\text{т}}/Q_{\text{д}}$.

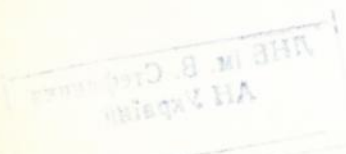
Выход 14 МэВ нейтронов существенно зависит от энергии ионов трития, подпитывающих мишень. Он максимален, когда обогащаемый тритием слой приходится на глубину, соответствующую резонансной энергии для атомарных ионов дейтерия, вступающих в T-D реакцию (рис.2, энергия ионов дейтерия $E_{\text{д}} = 150 \text{ кэВ} = \text{const}$)

Особенностью конструкции генератора, работающего на смешанных тритий-дейтериевых пучках, является замкнутая вакуумная система откачки. Тритий в источник ионов подавался посредством нагрева насыщенной им титановой пластины.

Пятая глава посвящена исследованию и оптимизации физико-технических характеристик низковольтных ускорителей для генерации нейтронов из реакций T(d,n) и D(d,n). В этой главе сформулированы задачи, возникающие при разработке генераторов нейтронов, и те требования, которые должны быть положены в основу или учтены при разработке важнейших узлов низковольтного ускорителя.

В процессе исследования, разработки и создания генераторов нейтронов разработаны несколько вариантов ускорительных трубок, ряд типов источников ионов и устройств питания их источников высокого напряжения для питания ускорительных трубок, различных типов мишенных устройств и т.д. [27, 32, 39, 66]

Проведен расчет траекторий ионов через электростатическую ускорительную трубку с учетом поля пространственного заряда пучка и поля электродов сложной конфигурации, который базируется на основе численного



решения уравнений движения ионов. [35] Результаты расчета полей были использованы при моделировании ряда новых типов ускорительных трубок (НГ-300). [36, 40] Расчеты показали, что важным фактором, влияющим на фокусировку пучка, кроме его объемного заряда является внешний диаметр вытягивающего электрода-экстрактора.

По результатам расчетов изготовлена, испытана и эксплуатируется ускорительная трубка для ускорения ионов изотопов водорода или гелия с силой тока $I=20$ мА и энергией до 250 кэВ. Трубка установлена на генераторе нейтронов НГ-300, который обеспечивает поток $I=4$ МэВ нейтронов более $5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ [40]

Для питания ускорительных трубок генератора нейтронов разработаны ряд высоковольтных источников напряжения 200-500 кВ и ток нагрузки $I=50$ мА и работающие как в сжатом газе, так и при атмосферном давлении.

Разработанная и практически реализованная высоковольтная установка для компактного генератора нейтронов представляет собой каскадную схему умножения напряжения, работающую в сжатом газе, помещенную в горизонтально расположенном стальном баке диаметром 500-700 мм и длиной 1000-1500 мм. Наполнение - углекислота. Рабочее давление внутри бака - $7 \cdot 10^6$ Па. [27, 29, 31]

Питание высоковольтной установки осуществляется от генератора - 100-350 кГц. Питание источника ионов осуществляется через распределительную емкостную колонну.

В генераторах нейтронов, работающих на воздухе, в качестве источника высокого напряжения использовались схемы Кокрофта-Уолтона на полупроводниковых диодах.

Проведены исследования работы в оптимальных режимах источников ионов различного типа (высокочастотного типа, типа "дуоплазматрон", типа пеннинга). Изучены зависимости атомарного, молекулярного и трехатомного компонентов тока, сфокусированного на мишени, от расхода дейтерия, тока электромагнита, мощности разряда, напряжений на электродах фокусирующей системы. Для регулировки и подачи трития в

источник разработано специальное устройство, в котором используется титановая пластинка, предварительно насыщенная тритием и нагреваемая электрическим током до нужной температуры. Экспериментально установлено, что наиболее благоприятным коэффициентом насыщения титана для рабочих давлений источника является $N \leq 1$.

Разработано и создано специальное мишенное устройство, которое предназначено для работы с мишенью диаметром 270 мм и активным слоем в виде кольца шириной 30 мм. [66]

Тыльная поверхность мишени охлаждается водой. Скорость вращения — 100 об/мин. При начальном потоке нейтронов $5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ выход нейтронов падал в два раза при флюенсе нейтронов — $1,8 \cdot 10^{16}$. [40]

Описана серия лабораторных генераторов нейтронов для ядерно-физических и радиационных исследований. Было создано свыше 20 установок разного типа, начиная от генератора нейтронов с потоком нейтронов 10^9 с^{-1} и кончая серией генераторов, позволяющих получать поток нейтронов до 10^{12} с^{-1} . [23, 24, 28, 32, 36, 37, 39, 41]

С целью повышения ресурса работы мишени и, следовательно, повышения эффективности использования генератора нейтронов разработаны и применены несколько способов увеличения интегрального потока нейтронов: способ подпитки мишени тритием, способ распыления поверхности мишени ионами тяжелых элементов, способ малоуглового разделения пучка дейтронов по массам, одновременно падающих на мишень, но на различные ее участки.

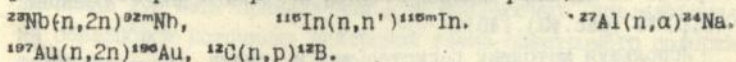
Для повышения КПД ускорения ионов в ускорительной трубке генераторов нейтронов используются магнитные поля для ограничения электронной проводимости трубки. Магниты из самарий-кобальтового сплава (или электромагнит) устанавливались сразу за ускорительной трубкой и служили, кроме подавления электронной проводимости, для малоуглового разделения пучка по массам.

В шестой главе обсуждаются вопросы метрологического обеспечения нейтронных измерений, радиационной защиты и

безопасности генераторов нейтронов. Для метрологического обеспечения нейтронных измерений создан комплекс образцовых средств измерений в соответствии с ГОСТ 8.105.80. В качестве основных методов измерений приняты нейтронно-активационный и сопутствующих частиц.

Государственная метрологическая аттестация комплекса образцовых средств измерений была выполнена совместно с НПО ВНИИМТРИ Госстандарта СССР с использованием эталонных средств характеристик нейтронных полей и активности нуклидов.

В качестве детекторов для измерения плотности потока и флюенса быстрых нейтронов использовались реакции:



Измерение активностей продуктов активации ниобия, индия, алюминия, золота и углерода нейтронами проводились на гамма-спектрометре с кристаллами NaI(Tl) или Cs(Tl) и гамма-спектрометре с Ge(Li) детектором типа ДГ ДК-4СА с многоканальным анализатором АМ-А-02И. [49, 51]

Для определения качества потока 14 МэВ нейтронов предлагается использовать в качестве монитора тонкие фольги из химически чистого золота, облучая их в поле нейтронов, а затем в гамма-спектрах продуктов активации наблюдать линии распада ядер $^{196\text{a}}\text{Au}$, $^{196\text{m}}\text{Au}$, образующихся в реакциях $(n,2n)$ и ядра ^{198}Au , образующегося в реакции (n,γ) на ^{197}Au , сечения которых известны с достаточной точностью. О величине потока 14 МэВ нейтронов судят по интенсивности наиболее сильных линий $^{196\text{m}}\text{Au}$ или $^{196\text{a}}\text{Au}$.

Сравнение интенсивностей близлежащих линий гамма-квантов с энергией 426 кэВ $^{196\text{m}}\text{Au}$ и гамма-квантов с энергией 412 кэВ ^{198}Au позволяет определить вклад нейтронов меньших энергий. [42, 46]

При импульсном режиме работы генератора нейтронов трудно получать стабильный поток нейтронов и поэтому погрешности измерений будут существенно зависеть от выбора монитора. Часто и используемые в качестве монитора борная

кислота или серебряная фольга в водородосодержащем замедлителе обладают большой инерционностью. Нами использовался практически безинерционный монитор нейтронного потока, работа которого основана на активации углерода по реакции $^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$ с последующим измерением радиоактивности ядра-продукта кристаллом Cs(Tl). [48,52] В качестве конструкционного материала датчика применен висмут, изотоп ^{209}Bi которого после облучения очень быстро распадается. Для поглощения β - частиц нуклидов ^{16}N и ^{12}B , использовался светопровод-экран, установленный между кристаллом CsI(Tl) и фотокатодом ФЭУ, из кристалла CsI. В диапазоне энергий нейтронов 16-18 МэВ измерена функция возбуждения реакции $^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$ (рис. 40). [49]

Используя методику регистрации и счета α - частиц, сопутствующих вылету нейтронов, можно установить однозначное соответствие между количеством получившихся в результате реакции нейтронов и числом зарегистрированных α - частиц.

В качестве детектора используется пленочный кристалл CsI(Tl) в сочетании с фотоэлектронным умножителем ФЭУ-87. Выбор элементов устройства производился с учетом минимизации длительности импульса с анода фотоэлектронного умножителя с целью увеличения скорости счета α - частиц детектором. Абсолютные измерения флюенса первичных нейтронов производились с точностью 5%.

Принцип создания и метрологической аттестации образцовых источников (ОИ) регламентируется соответствующими нормативными документами и включают в себя образцовые источники нейтронов, создаваемые на отдельных ядерно-физических установках, нейтронные радиометры, обеспечивающие мониторингирование нейтронных полей при реализации практических задач на установках. Источники типа ОИ-Г включают в себя опорное нейтронное поле (ОП) и средства мониторингирования флюенса нейтронов.

Метрологическая аттестация в качестве образцового средства измерения 2 разряда (ГОСТ 8.105.-80) источника 14-15 МэВ нейтронов с выходом $5 \cdot 10^{14}$ н/с проведена с помощью

Аттестация образцового источника нейтронов производилась путем сличения его с Государственным специальным эталоном единиц плотности потока и флюенса нейтронов. Использовались активационные детекторы на основе ядерных реакций $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ и $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$ с регистрацией гамма-линий 1368 и 934,5 кэВ соответственно.

Дополнительно для мониторингирования на источнике I^A-I^B МэВ нейтронов используются детекторы на основе реакций $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196}\text{Au}$, $^{197}\text{Au}(n,2n)^{196m}\text{Au}$, $^{197}\text{Au}(n,p^+)^{197}\text{Au}$, а для нейтронов от D(d,n) реакции $^{115}\text{I}(n,p^+)^{115m}\text{In}$ с пороговой энергией 1,2 МэВ. Применяемый в активационных исследованиях на образцовом источнике нейтронов гамма-спектрометр содержит GeLi детектор типа ДГДК и многоканальный анализатор АМ-А-0242 или АМА-0351. Обработка гамма-спектров выполнялась автоматически на ЭВМ по специальной программе.

Повышение потока нейтронов на ядерно-физических установках от апробированных значений (10^9 - 10^{10} н/с) до необходимого для радиационно-физических исследований уровня 10^{11} - 10^{12} с⁻¹ связано с изучением и модернизацией его радиационной защиты. [43]

При изучении защиты источников нейтронов нашли применение целый ряд программ расчетов на ЭВМ полей нейтронного и вторичного фотонного излучений (одномерные двумерные, трехмерные), использующие системы групповых констант, сформированные на основе файлов оцененных ядерных данных.

Предварительно для модельной сферической железо-полиэтиленовой композиции с центральным источником I^A МэВ нейтронов осуществлено сравнение относительно экспрессных одномерных программ типа ANISN, BLANK и PO3-6.3 многогрупповых расчетов полей нейтронного и вторичного фотонного излучения на ЭВМ с библиотеками групповых ядерных констант типа DLS-23/CASK, ENDL-75 и FHAB-78 соответственно. Надо отметить удовлетворительное согласие результатов расчетов по разным программам. [44,45]

Определенную радиационную опасность представляет активность, наведенная быстрыми нейтронами в конструкционных материалах генератора нейтронов. В таблице 2 представлены результаты экспериментально измеряемой удельной активности конструкционных материалов на расстоянии 10 см от мишени после часа работы генератора с потоком нейтронов $2,5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$.

Таблица 2

| Реакция | Удельная активность на расстоянии 10 см от мишени генератора мк Си ($\text{кг}^{-1} \text{ час}^{-1}$) | Период полураспада продукта активации |
|--|--|---------------------------------------|
| $^{27}\text{Al}(n,p)^{27}\text{Mg}$ | 52 | 9,5 мин |
| $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ | 7,7 | 14,9 час |
| $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{62}\text{Cu}$ | 15 | 9,8 мин |
| $^{63}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$ | 15 | 12,8 час |

В седьмой главе представлены экспериментальные комплексы оборудования для ядерно-физических исследований, а также некоторые результаты апробирования их в экспериментах.

А. Ионно-лучевая установка.

Для сварки ионным пучком в первую очередь необходимо: 1) располагать соответствующим источником ионов; 2) правильно выбрать систему извлечения и формирования ионного пучка; 3) решить проблему фокусировки и транспортировки пучка с необходимой удельной мощностью к месту соприкосновения его с изделием.

Существенно повысить удельную мощность пучка можно путем уменьшения его поперечника за счет компенсации объемного заряда ионного пучка ионизацией этим пучком атомов остаточного газа в системе и простым увеличением энергии ионов.

С целью проведения глубокой сварки металлов разработана и изготовлена установка для получения сфокусированных ионных пучков с энергией ~200 кэВ и током ~30 мА, которая обеспечивает среднюю удельную мощность на мишени $\sim 10^6 \text{ Вт/см}^2$, а максимальную удельную мощность в центре пучка $\geq 10^7 \text{ Вт/см}^2$. [38,40]

По предложению института электросварки им.Е.О.Патона совместно с институтом физики АН Украины, на территории которого установлена разработанная нами установка, проведена сварка образцов из титанового сплава BT-I-10. Образцы сваривались токами ионов водорода и аргона. Исследования сварных соединений, проведенных в ИЭО им. Е.О.Патона показали, что пористость шва при сварке ионным пучком водорода не превышает пористости при электронно-лучевой сварке. Содержание водорода в шве при этом в 1,5-2 раза ниже, чем в основном металле. Сварка пучком ионов аргона дает меньшую пористость, чем сварка электронным пучком.

Б. Аппаратурный комплекс для проведения калибровочных измерений детекторов заряженных частиц.

Разработан и эксплуатируется прецизионный сверхслаботочный ускоритель тяжелых ионов, который используется для калибровки детекторов заряженных частиц, ионного легирования и других физических исследований, требующих небольших потоков ионов. Основные технические характеристики сверхслаботочного ускорителя приведены в табл.3. [33,34]

Таблица 3

| Параметр | Значение |
|--|------------------------------|
| Максимальная энергия ионов, кэВ | 540 |
| Точность установки напряжения по току делителя, кВ | ± 1 |
| по ЯМР, В | ± 75 |
| Максимальный ток нагрузки, А | 10^{-4} |
| Пульсация выходного напряжения, В | 75 |
| Интенсивность потока ионов плавно регулируемая, А | $10^{-17} - 3 \cdot 10^{-6}$ |
| Габаритный размер, мм | 320x610 |
| Изоляция, сред. | 95% CO_2 + 5% SF_6 |
| Давление газа в котле, Па | $7,5 \cdot 10^6$ |
| Потребляемая мощность, кВт | 3,5 |

На ускорителе выполнен цикл работ по калибровке различных типов детекторов (полупроводниковых, сцинтилляционных), изучению световых выходов различных сцинтилляторов и эффективности счета ионов низких и средних энергий различного типа канальными электронными умножителями. [57-59]

Ускоритель укомплектован необходимой ядерно-физической аппаратурой и ЭВМ. Сверхслаботочный ускоритель зарекомендовал себя в течении всего времени работы надежным и удобным в эксплуатации.

В качестве иллюстрации практического использования комплекса аппаратуры, в состав которой входит сверхслаботочный ускоритель, приведем результат исследования сцинтилляционного спектрометра РИП-806, применявшегося на спутниках "Ореол" и "Ореол-2" по советско-французскому эксперименту "АГРАД", для измерения спектра протонов, выпадающих в авроральной зоне из плазменного слоя и пояса кольцевого тока.

Реальные измерения на спутниках "Ореол" и "Ореол-2" в области протонного кольцевого тока на L - оболочках 4,60-4,65 на высотах 2000-3000 км достаточно хорошо совпадают между собой; сравнение их с данными протонного детектора, полученными со спутника O76 В на тех же оболочках, также свидетельствует о согласовании измерений как по абсолютной интенсивности протонов, так и по наклону спектров (рис. II). [57]

В. Применение нейтронных пучков для активационного анализа состава вещества.

Разработанные способы стабилизации потока нейтронов позволяют улучшить чувствительность определения ряда элементов и снизить границу определяемых содержаний веществ в металлах, минеральном сырье, а также увеличить производительность метода при анализе по короткоживущим изотопам. Увеличение интегрального потока нейтронов дало возможность уменьшить вклад случайной погрешности анализа.

Для быстрого и точного определения углерода в сталях, сплавах и других материалах с относительно высоким содержанием углерода применен активационный анализ с помощью высокоинтенсивного источника быстрых нейтронов.

Основным источником фона при определении по реакции $^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$ является, главным образом, изотоп ^{14}N - продукт реакции $^{16}\text{O}(n,p)$. Основным источником кислорода является

стеклянный баллон ФЭУ. Ясно, что между кристаллом CsI(Tl) и фотокатодом ФЭУ должен находиться светопровод - экран, поглощающий бета-излучение изотопов ^{14}C и ^{32}P , образующихся под действием быстрых нейтронов на материалах ФЭУ. Нами в качестве светопровода использовался кристалл CsI, который без таллия не является сцинтиллирующим веществом. Толщина светопровода (~5 см) выбрана из расчета полного поглощения жесткого бета-излучения и гамма-квантов средних энергий.

При расположении детектора вблизи источника нейтронов происходит активация защитных и конструкционных материалов, что вносит дополнительный вклад в общий фон и приводит к увеличению общих загрузок ФЭУ и нестабильности работы установки в целом.

Анализ веществ, пригодных к использованию в качестве конструкционного и защитного материала, проведенный нами, показал пригодность для этой роли висмута. Определение содержания углерода и изучение функции возбуждения в реакции $^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$ проводилось в лабораторных условиях на ускорителе Киевского госуниверситета нами совместно с В.Т.Тустановским. [49,49,52]

Анализировались следующие материалы: стали, твердые сплавы. Для каждого образца проводилось семь параллельных измерений. Через каждые три-четыре измерения регистрировалась активность ф.а и эталона. В качестве эталона использовался образец стали с содержанием углерода $0,8 \pm 0,001\%$.

В табл.4 показаны результаты нейтронно-активационного и других методов определения углерода в образцах стали. Как видно из табл.4 получена хорошая сходимость результатов нейтронно-активационного метода и других методов определения углерода: сжигания, окислительного плавления в вакууме.

Таблица 4

| № | Содержание углерода, % НАА | Другие методы |
|----|----------------------------|-----------------|
| 1. | $0,96 \pm 0,03$ | $0,96 \pm 0,05$ |
| 2. | $0,14 \pm 0,11$ | $0,16 \pm 0,02$ |
| 3. | $0,16 \pm 0,1$ | $0,16 \pm 0,02$ |
| 4. | $0,43 \pm 0,05$ | $0,45 \pm 0,02$ |

Комплекс ядерно-физической аппаратуры и метод нейтронно-активационного анализа использовался нами также для определения различных примесей в моторных маслах отечественного и зарубежного производства. [60]

Измерения наведенной быстрыми нейтронами активности производились на германий-литиевом спектрометре в комплекте с анализатором АМ-А-02Ф1. Разрешение спектрометра составляло 3,5 кэВ на линиях ^{60}Co .

Плотность потока 14,6 МэВ нейтронов определялась по активности алюминиевой фольги по линиям $E\gamma_1 = 1368$ МэВ и $E\gamma_2 = 2754$ КэВ изотопа ^{24}Na из реакции $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$.

Результаты исследования элементного состава некоторых масел представлены в табл.5.

Таблица 5

| Образец 1 | | Образец 2 | |
|-----------|-------------------------------|-----------|-------------------------------|
| Элемент | Масса элемента, г/кг вещества | Элемент | Масса элемента, г/кг вещества |
| Ca | 13,5±0,7 | Ca | 3,01±0,33 |
| Al | 0,112±0,007 | Al | 0,594±0,035 |
| Ba | (7,8±1,3)·10 ⁻² | Cl | 1,47±0,09 |
| Sr | (3,9±0,6)·10 ⁻² | Ba | (4,9±0,7)·10 ⁻² |
| Fe | (6,5±0,9)·10 ⁻² | Sr | (2,26±0,43)·10 ⁻² |
| | | Zn | (5,2±1,2)·10 ⁻² |
| | | Fe | (9,3±0,5)·10 ⁻² |

Перечисленные примеры свидетельствуют о больших возможностях метода с использованием ядерно-физических комплексов при решении самых разных проблем.

Общий итог работы сводится к следующему:

1. Проведен анализ современного состояния разработок в области нейтронных источников нейтронов. Систематизированы методы увеличения выхода и повышения стабильности во времени потока гермоядерных нейтронов из мишенных узлов генераторов нейтронов.
2. Аналитически решена задача о термодиффузионном перераспределении концентрации изотопов водорода (дейтерия, трития) в многослойной структуре мишени генератора нейтронов и изучена эволюция термодинамически неравновесных

послеимплантационных распределений.

3. Аналитически решена задача о потоке быстрых нейтронов с учетом термодиффузионного перераспределения изотопов водорода в многослойной набивной мишени генератора нейтронов и проанализированы различные предельные случаи. Показано, что наличие статистического разброса пробегов дейтронов в веществе мишени (страгглинга) приводит к увеличению уровня насыщения выхода нейтронов.

4. Предложена и экспериментально реализована методика вычисления коэффициентов диффузии и скорости десорбции, определяющих утечку имплантированных в мишень изов изотопов водорода в условиях облучения по измерению потока нейтронов в зависимости от времени имплантации.

5. Предложена модель нахождения профилей изотопов водорода (и любых других примесей) при больших дозах внедрения с учетом распыления поверхности мишени "тяжелыми" ионами. Показано, что путем распыления поверхности металл-третиевой мишени "тяжелыми" ионами можно стабилизировать выход термоядерных нейтронов во времени.

6. Проведены исследования набивных мишеней, показавшие пригодность их для генераторов нейтронов. Максимальный выход нейтронов из набивных мишеней получен в случае использования материалов, хорошо растворяющих изотопы водорода, эких как титан, цирконий, скандий, иттрий, зрбий и группы редких земель. Для предотвращения диффузии изотопов водорода вглубь металла необходимо использовать металлы, образующие с водородом прочные химические связи, нанесенные в виде тонкого слоя на подложку с малой растворимостью изотопов водорода и большой теплопроводностью. В мишенях из хрома и ниобия обнаружены особенности при имплантации трития.

7. Проведены исследования выхода термоядерных нейтронов в мишенях из циркония, меди, тантала, ниобия, скандия, иттрия, празеодима, зрбий до и после высокотемпературного отжига. Полученные результаты свидетельствуют о том, что мишени из зрбий, празеодима, иттрия и скандия являются более термостойкими по сравнению с титаном.

8. Проведено исследование самопроизвольной десорбции внедренного трития из титановой мишени при комнатной температуре. Анализ экспериментальных результатов свидетельствует об относительно небольшой подвижности внедренного трития.

9. Разработана и создана экспериментальная установка - генератор нейтронов, имеющий замкнутую систему откачки, что позволило применить тритиевый пучок для пополнения убыли трития в мишени. Разработана система подачи трития в источник ионов.

Исследованы режимы работы генератора нейтронов на смешанном тритий-дейтериевом пучке и при периодической подпитке мишени тритием.

Достижимый в экспериментальном генераторе средний поток нейтронов из реакции T-D $(5+10) \cdot 10^{10}$ н/с поддерживается на одном уровне не менее $3 \cdot 10^8$ с.

10. Разработаны и созданы свыше двадцати генераторов нейтронов разных типов с потоком термоядерных нейтронов в диапазоне от $(5+10) \cdot 10^7$ н/с до $(5+10) \cdot 10^{11}$ н/с, которые успешно работали и работают в ряде организаций бывшего Советского Союза.

В процессе создания и совершенствования генераторов нейтронов были разработаны несколько вариантов ускорительных трубок, ряд типов источников ионов и мишенных устройств, различные варианты вакуумных систем и систем питания источников ионов.

11. Разработаны и изготовлены источники постоянного высокого напряжения в сжатом газе (250 кВ, 350 кВ, 500 кВ), которые, имея малые габариты, легко транспортируются, не требуют специальных помещений. Размещение элементов схемы умножения напряжения на электродах ускорительной трубки, позволяет разрешить проблему создания малогабаритного генератора нейтронов.

12. Для метрологического обеспечения нейтронных измерений разработан и создан комплекс образцовых средств измерений в соответствии с ГОСТ 9.105-80. В качестве основных методов

измерений принят нейтронно-активационный и сопутствующих частиц.

13. Для мониторинга потока быстрых нейтронов при работе генератора нейтронов в импульсном режиме предложен и разработан монитор на основе реакции $^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$. Измерена функция возбуждения этой реакции в диапазоне энергий нейтронов 16-18 МэВ. Уточнены сечения реакций.

14. Разработан и создан на базе ускорителя сверхслабых токов (10^{-17}) аппаратный комплекс для проведения калибровочных измерений детекторов заряженных частиц.

15. Разработан и создан на базе разработанных сильноточных ускорителей (удельная мощность пучка $\sim 10^6$ Вт/см 2) экспериментальный комплекс специального электрофизического оборудования для проведения ионной лучевой сварки металлов. Исследования сварных соединений, проведенных в ИЭС им.Е.О. Патона, показали, что пористость шва при сварке ионным пучком водорода не превышает пористости при электронно-лучевой сварке.

16. На базе сильнопоточного генератора нейтронов создан комплекс аппаратуры для нейтронно-активационного определения углерода в сталях, твердых сплавах и других материалах, а также кальция, алюминия, хлора и других элементов в моторных маслах.

Основные положения диссертации изложены в следующих литературных источниках:

1. Применко Г.И., Белюсенко Н.А., Коломиец Н.Ф. Методы увеличения выхода и повышения стабильности потока термоядерных нейтронов мишеней узлов нейтронных генераторов // Нейтронно-энергетические проблемы термоядерных установок. М.: ЭНИН. 1989-с.65-72.
2. Применко Г.И., Стрижак В.И., Белюсенко Н.А. и др. Некоторые вопросы оптимизации использования мишеней для генераторов нейтронов. // Украинский физический журнал. -1989. - 12. -с.1767-1773.
3. Применко Г.И., Стрижак В.И., Чикаи И. и др.. 14 МэВ нейтроны - пути увеличения выхода нейтронов и стабильности его во времени. // Изв. Вузов. Физика. -1988. - Т.31. -5. -с. 27-31.
4. Применко Г.И., Стрижак В.И., Белюсенко Н.А., Бродер Д.Л.. Некоторые вопросы разработки мишеней для генератора

- нейтронов. // Вопросы атомной науки и техники. Радиационная техника.-1990.-Вып. I (41).-с. 14.
5. Стрижак В.И., Степаненко В.А., Применко Г.И. // Вопросы физики быстрых нейтронов. Мишени для получения нейтронов. К.: КГУ. 1972-с.140.
 6. Применко Г.И., Кухленко А.С., Тараканов В.К. Экспериментальное обеспечение решения инженерных проблем blankets и радиационной защиты термоядерного реактора. Киев. 1985. Заключительный отчет. Госрегистрации - № 81001363.
 7. Применко Г.И., Стрижак В.И., Белюсенко Н.А. и др. // Тезисы 2 Всесоюзного научно-технического совещания "Вопросы разработки и применения портативных генераторов нейтронов". М.: 1987-с.51-52.
 8. Коломиец Н.Ф., Применко Г.И., Стрижак В.И., Белюсенко Н.А., Шиканов А.Е., Цибин А.С. Источники нейтронов. К.: Высшая школа. 1993.-240 с.
 9. Teubin A.S., Belyuzen N.A., Kolomiels N.F., Primenko G.I. New Source. Of 14 Mev Neutrons For Radiation Physics And Thermonuclear Researches. // 5-th International Symposium On Radiation Physics. Yugoslavia.-1991.-p.11-47.
 10. Дехтяр М.И., Применко Г.И., Стрижак В.И. О многослойных набивных мишенях для получения Д-Д нейтронов // Атомная энергия-1978.-Т 44 Вып. 6.-с.512-513.
 11. Дехтяр М.И., Применко Г.И., Стрижак В.И.; Набивные двухслойные мишени для Д-Д реакции // Нейтронная физика. М: ЦНИИАтоминформ. 1980.-Т 4.-с.146-148.
 12. Дехтяр М.И., Ежов С.Н., Применко Г.И. Распределение дейтронов и выход нейтронов из набивных мишеней с подложкой // Нейтронная физика. М: ЦНИИАтоминформ. 1984.-Т 4-с.261-263.
 13. Бобыр В.В., Гуртовой М.Е., Применко Г.И. и др. Взаимодействие быстрых нейтронов с атомными ядрами. Заключительный отчет. Киев, 1975. Госрегистрация № 71071408.
 14. Гулько В.М., Коломиец Н.Ф., Применко Г.И., Шиканов А.Е. Пространственно-временные зависимости температуры и концентрации нуклидов водорода в плазмообразующей мишени лазерного источника дейтронов. // Изв. Вузов. Физика. 1988.-Т 31.-№ 5.-с. 49-53.
 15. Дехтяр М.И., Неплюев В.М., Применко Г.И., Седов Д.А., Тараканов В.К. Измерение коэффициентов диффузии и скорости десорбции в вакуум дейтерия в условиях облучения металлических мишеней ионными пучками // Материал Международной конференции. "Структурно-динамические процессы в неупорядоченных средах". -Смарканд: СГУ. 1992.-с.132.
 16. Стрижак В.И., Применко Г.И.; К вопросу о десорбции трития, внедренного в металл // Украинский физический журнал. 1970.-Т. 15. №1. с.169-171.
 17. Стрижак В.И., Применко Г.И., Пронман И.М.. Создание и исследование набивных мишеней для реакции Д-Т // Атомная энергия. 1970.-Т 28. Вып. 3.-с.251-252.
 18. Кацауров Л.Н., Стрижак В.И., Применко Г.И., Пронман И.М. Набивные тритиевые мишени из скандия, иттрия, празеодима и

- неодима // Атомная энергия. 1970-Т. 28- Вып.3.-с. 249-251.
19. Кацауров Л.Н., Применко Г.И., Степаненко В.А. и др. Исследования условий насыщения тритием наивышней мишеней из титана, циркония, тантала, ниобия // Производство изотопов М.: Атомиздат. Ч.1-1973.-с.261-263.
 20. Применко Г.И., Стрижак В.И. Исследование наивышней мишеней для реакции Т+Д // Вестник Киевского у-та. Сер. Физика. 1985.- № 26-с.115-117.
 21. Применко Г.И., Голубев В.Н., Наплюев В.М., и др. Многослойные мишени - один из способов стабилизации потока Д-Т нейтронов // Нейтронная физика. М.: ЦНИИатоминформ. 1988.-Т 4-с.39.
 22. Стрижак В.И., Применко Г.И., Тустановский В.Т. Исследования взаимодействия быстрых ионов трития с титаном. // Атомная энергия. 1969-Т 27.-Вып. 2.-с.158-160.
 23. Применко Г.И., Наплюев В.М., Стрижак В.И. Генераторы 14 МэВ нейтронов-проблемы и решения. // Тезисы третьего Всесоюзного совещания. "Вопросы разработки и применения портативных генераторов нейтронов"-М.: ВНИИрт, 1983.-с.2.
 24. Барит И.Я., Дуев Л.Т., Кацауров Л.Н., Применко Г.И. и др. Нейтронный генератор на смешанных дейтерий-третиевых пучках для активационного анализа // Активационный анализ. Ташкент: ФАН-1971. с.279-281.
 25. Применко Г.И., Наплюев В.М., Стрижак В.И., Генераторы нейтронов с наивышними мишенями. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Радиационная физика. 1990. Вып.2(42).-с.13-16.
 26. Применко Г.И., Наплюев В.М., Стрижак В.И. Генерация быстрых нейтронов наивышними мишенями // Нейтронная физика. 1988.-Т 4.-с.35-38.
 27. Бобыр В.В., Годман В.И., Крыштаб Г.С., Посохов Н.А., Применко Г.И. Источник нейтронов на основе 350 кэВ ускорителя заряженных частиц. // Вестник Киевского гос-та. -1967.- № 8-с.65-67.
 28. Бобыр В.В., Применко Г.И., Прокопец Г.А., и др. Нейтронные генераторы для физических исследований и активационного анализа // Активационный анализ. Ташкент.: ФАН-1977.-с.273-274.
 29. Стрижак В.И., Посохов Н.А., Применко Г.И., и др. Каскадный ускоритель заряженных частиц - источник быстрых нейтронов // Вестник Киевского гос-та. Сер. Физика.-1975.- № 6.-с.49-51.
 30. Коломиец В.М., Применко Г.И., Стрижак В.И., Усиков Ю.И. Простой способ регенерации нососов НЭМ-300 // Приборы и техника эксперимента.-1975.- № 6.-с.225.
 31. Стрижак В.И., Посохов Н.А., Применко Г.И., Тараканов В.К. 500 кэВ ускоритель ионов - источник быстрых нейтронов // Приборы и техника эксперимента.-1975.- № 6.-с.15-16.
 32. Стрижак В.И., Лещенко В.Е., Применко Г.И., Нейтронные генераторы для промышленного применения // Atomki Kozlomenyek. -1976-Р.331-333.
 33. Стрижак В.И., Применко Г.И., Усиков Ю.И., Эстулин И.В., Сверхслаботочный источник ионов // Прикладная ядерная спектроскопия. М.: Атомиздат. 1977- № 7.-с.204-205.
 34. Стрижак В.И., Применко Г.И., Усиков Ю.И., Эстулин И.В.

- Прецизионный ускоритель// Приборы и техника эксперимента.-1978.-№ 5-с.25-27.
35. Гоменик В.Г., Дротик К.И., Применко Г.И. и др. Некоторые особенности расчета ускорительной трубки для сильноточного нейтронного генератора //Вестник Киевского у-та.-Сер.Физ.1979.-№ 20-с.42-45.
36. Кухленко А.С., Неплюев В.М., Применко Г.И., и др. Высокоинтенсивный и высокоградиентный источник протонов //Ускорители ионов низких и средних энергий.К.:Наукова Думка.-1982.с.144-146.
37. Кухленко А.С., Неплюев В.М., Применко Г.И. и др.//Сильнопоточный генератор 14 МэВ нейтронов// Нейтронная физика М.:ЦНИАтоминформ.-1984.-Т 4.-с.283-284.
38. Dekhtyar M.I., Maydanuk V.K., Neplyuev V.M., Primenko G.I. et al. Intense 14 Mev Neutron Generator. //Properties Of Neutron Sources.-Vienna. 1987.-p.365-367.эп.
39. Войтенко В.А., Гулько В.М., Применко Г.И., др. Импульсный генератор //А.С.№ 1367755.
40. Применко Г.И., Майданюк В.К., Неплюев В.М. и др. Генератор нейтронов с выходом нейтронов $5 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ // Приборы и техника эксперимента.-1989-№ 6.-с.39-41.
41. Бродер Д.Л., Белюсенко Н.А., Применко Г.И., и др. Генератор 14 МэВ нейтронов // Вопросы атомной науки и техники.Сер. Радиационная техника.-1990-Вып.1(41)-с.9-11.
42. Майданюк В.К., Неплюев В.М., Применко Г.И. и др. Об использовании золота в качестве монитора 14 МэВ нейтронов // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Вопросы разработки и применения портативных генераторов нейтронов.-1987.-с.157-158
43. Стрижак В.И., Применко Г.И., Белюсенко Н.А., Бродер Д.Л., Повышение нейтронной мощности оборудования и обеспечения его безопасности //Нейтронная физика.М.:ЦНИАтоминформ.-1988.-Т. 4.-с.136.
44. Белюсенко Н.А., Коломиец Н.Ф., Кондурашкин Н.А., Применко Г.И., Стрижак В.И.; Радиационная защита комплексов нейтронно-физического оборудования для радиационно-физических и термоядерных исследований (моделирование защиты)// Тезисы докладов 5 Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок.Протвино-1989.-с.156.
45. Белюсенко Н.А., Коломиец Н.Ф., Кондурашкин Н.А., Применко Г.И., Стрижак В.И.; Радиационная защита комплексов нейтронно-физического оборудования для радиационно-физических и термоядерных исследований (обзор результатов исследований защиты)//Тезисы докладов 5 Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок.Протвино-1989.-с.157.
46. Майданюк В.К., Неплюев В.М., Применко Г.И., и др. Определение сечения возбуждения изомерного состояния золота в реакции (n, γ) Т-Д нейтронами//Нейтронная физика.М.:ЦНИАтоминформ.1988.-Т 3.с.329.
47. Белюсенко Н.А., Майданюк В.К., Неплюев В.М., Применко Г.И. и др. Спращовий источник 14-15 МэВ нейтронов с

- выходом $5 \cdot 10^{11}$ н/с для радиационно-физических и термоядерных исследований // Пятая Всесоюзная конференция "Метрология нейтронного излучения на реакторах и ускорителях". М.: 1990.-с.23-25.
48. Стрижак В.И., Бобрь В.В., Применко Г.И., др. Изучение реакции $^{12}\text{C}(n,p)$ для целей активационного анализа // тезисы докладов 3 Всесоюзного совещания по активационному анализу. Ташкент. ФАН.-1972.-с.22.
49. Стрижак В.И., Бобрь В.В., Применко Г.И. и др. Исследование функции возбуждения реакции $^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$ при энергии нейтронов 16-17 МэВ // Известия АН СССР -1972.-Т 36.-с.2621-2623.
50. Билусенко Н.А., Коломиец Н.Ф., Кондурашкин Н.А., Применко Г.И., Стрижак В.И. Радиационная защита комплекса альфа, бета, гамма и нейтронных установок для радиационно-физических и термоядерных исследований (моделирование защиты) // Тезисы докладов 5 Всесоюзной научной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Протвино.1989.-с.158.
51. Демехин В.Л., Майданок В.К., Неплюев В.М., Применко Г.И., Тараканов В.К. Гамма-спектрометрическое изучение сечения радиационного захвата нейтронов с $E=2,7$ МэВ на ^{115}In и ^{197}Au // Тезисы докладов 36 Всесоюзного совещания "Ядерная спектроскопия и структура ядра".1986.-с.94-95.
52. Бобрь В.В., Применко Г.И., Равьяк К.К., и др. Резонанс в сечении $^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$ реакции при энергии нейтронов 17 МэВ // Тезисы докладов 21 Всесоюзного совещания "Ядерная спектроскопия и структура ядра".1972.-с.14.
53. Белусенко Н.А., Майданок В.К., Неплюев В.М., Применко Г.И. и др. Образцовый источник 14-15 МэВ нейтронов с выходом $5 \cdot 10^{11}$ н/с для радиационно-физических и термоядерных исследований (исследования гамма спектрометра с кристаллом висмута) // 5 Всесоюзное совещание по метрологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях. М.1990.-с.26-27.
54. Tsybin A.S., Belusenko N.A., Kolomiets N.P., Primenko G.I. Modeling Of α, β, γ And Neutron Source Used For Radiation Processing Of Semiconductiv Elements. // 5-th International Symposium On Radiation Physics. Dubrovnik. Ygoslavia. -1991.-p.21.
55. Применко Г.И., Дехтяр М.И., Неплюев В.М., Тараканов В.К. Исследование характеристик источников быстрых нейтронов и радиационной стойкости полупроводниковых изделий // Заключительный отчет. К.-1989.
56. Стрижак В.И., Бобрь В.В., Применко Г.И. и др. Установка для активационного анализа, использующая пучок нейтронов с энергией 15.5 МэВ // Тезисы докладов 3 Всесоюзного совещания по активационному анализу. Ташкент 1972.-с.22.
57. Веревкин А.Д., Гольперин Ю.И., Применко Г.И., и др. Исследование характеристик сцинтилляционного спектрометра протонов средних энергий // Препринт-446 ин-та космических исследований. АН СССР.-1979.-с.16.
58. Усиков Ю.И., Применко Г.И., Темный В.В., Эстулин И.В. Изучение эффективности счета ионизации с энергиями 20-540 кэВ

- канальными электронными умножителями //Препринт-536 ин-та космических исследований АН СССР.-1979.-с.22.
59. Усиков Ю.И., Видей Ю.Т., Применко Г.И., Цирлин Ю.А. Исследование характеристик сцинтилляторов на основе CsI при регистрации протонов с энергией 20-540 кэВ //Приборы и техника эксперимента.-1984.-№ 1.-с.86-89.
60. Бавин И.И., Зорин В.А., Майданьк В.К., Применко Г.И. и др. Исследование свойств молибденоносодержащих присадок к маслам методом нейтронно-активационного анализа //Тезисы докладов 2 Всесоюзной научно-технической конференции "Вопросы разработки и применения портативных генераторов нейтронов"-1987.-с.125-126.
61. Стрижак В.И., Применко Г.И., Белюсенько Н.А. и др. Разработка комплекса радиационно-физического оборудования для нейтронно-физических исследований (вопросы обеспечения научно-технического физика.М.:ЦНИИатоминформ. 1988.- Т 4.-с.141-146.
62. Стрижак В.И., Применко Г.И., Белюсенько Н.А., и др. Разработка комплекса радиационно-физического оборудования для нейтронно-физических исследований (повышение мощности и обеспечение безопасности) //Нейтронная физика.М.:ЦНИИатоминформ.1988.-Т 4.-с.136-140.
63. Применко Г.И., Майданьк В.К., Колотухин К.И. и др. Разработка нейтронной испытательной установки НОН-10 //Нейтронно-энергетические проблемы термоядерных установок.М.:ЭИИИ.1989.-с.53.
64. Белюсенько Н.А., Майданьк В.К., Непляев В.М., Применко Г.И. и др. Моделирование поля термоядерных нейтронов для обработки полупроводниковых пластин //Тезисы докладов 5 Всесоюзного совещания по м трологии нейтронного излучения на реакторах и ускорителях.М.:1980.-с.206-209.
65. Коломиец В.М., Применко Г.И., Стрижак В.И.; Стабильный источник ионов для сверхслаботочного ускорителя протонов с максимальной энергией 400 кэВ // Вестник Киевского госунивер-та.Сер.Физика.1975.-с.49-51.
66. Непляев В.М., Посохов Н.А., Применко Г.И. и др. Вращающаяся охлаждаемая водой тритиевая мишень для генератора нейтронов //Вопросы атомной науки и техники.Сер.Радиационная техника.-1990.-Вып.1(41)-с.21-22.
67. А.С. Способ получения стабилизированных во времени потоков ДТ нейтронов в нейтронных генераторах. Применко Г.И., Говенских П.А., Гулько В.М., Коломиец Н.Ф., Шванов А.Е. //Принт. 31.07.92. - не опубл.

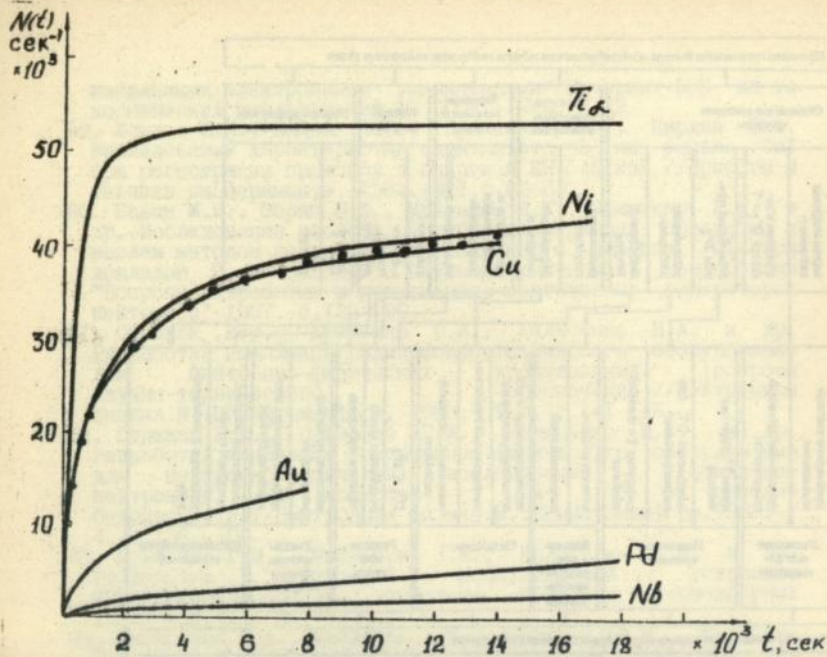


Рис. 3. | Выход нейтронов в зависимости от времени набивки мишени: сплошные кривые - расчетные значения; точки - экспериментальные результаты

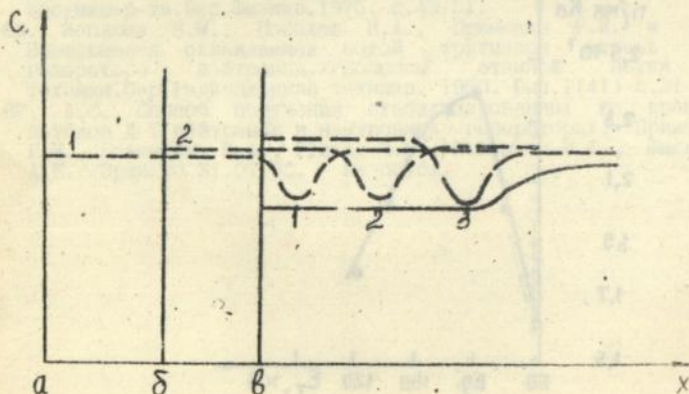


Рис. 4. | Распределение трития в расплываемой пучком тяжелых ионов мишени

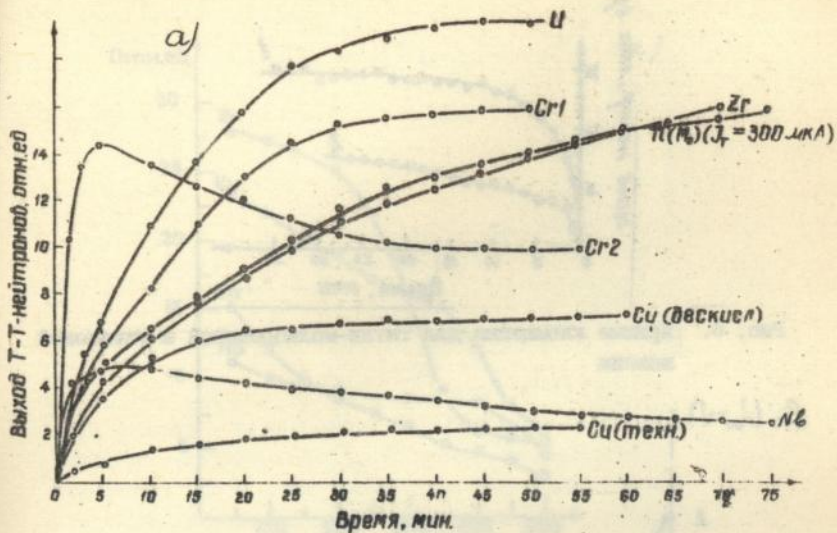
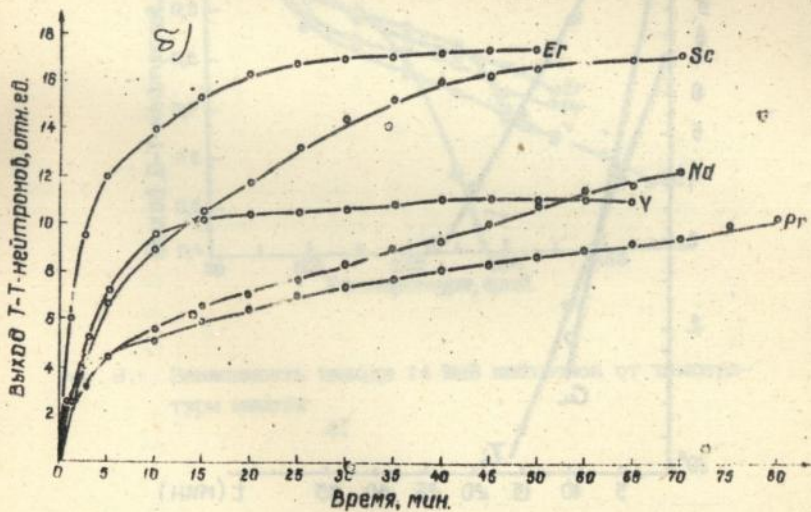


Рис. 5. Выход нейтронов из реакции $T(t,2n)$ на називных мишенях в зависимости от времени облучения



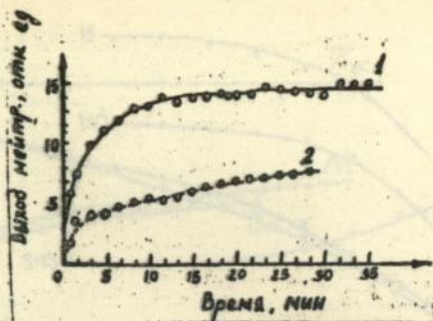


Рис. 6. Кривые насыщения для титан-молибденовой и титановой мишени

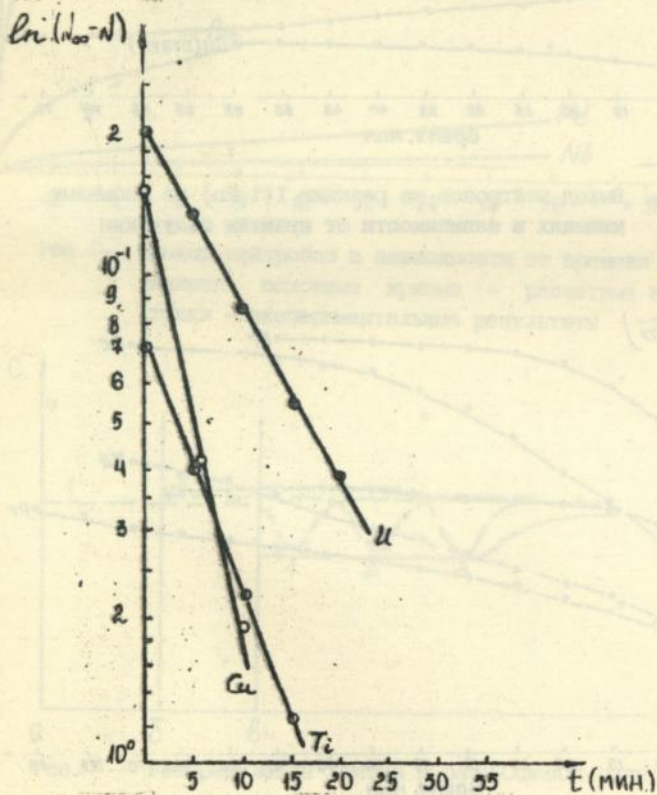


Рис. 7. Зависимость $\ln(N_{\infty} - N)$ от времени

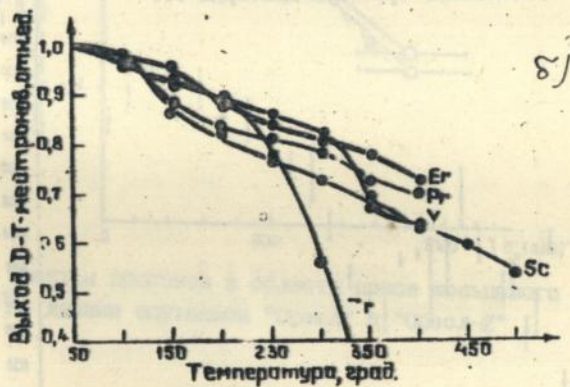
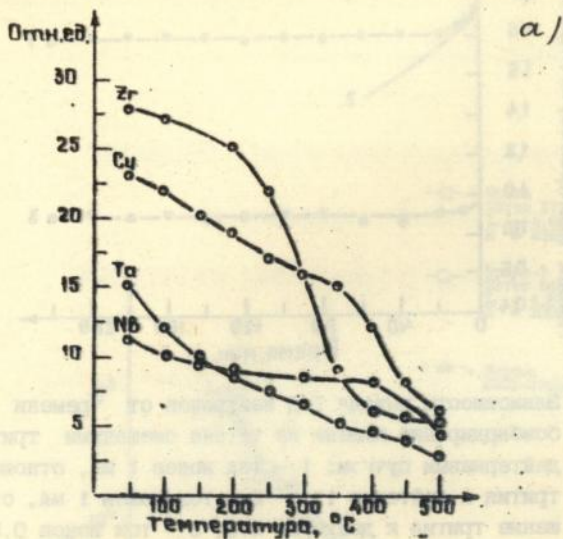


Рис. 3.1. Зависимость выхода 14 МэВ нейтронов от температуры мишени

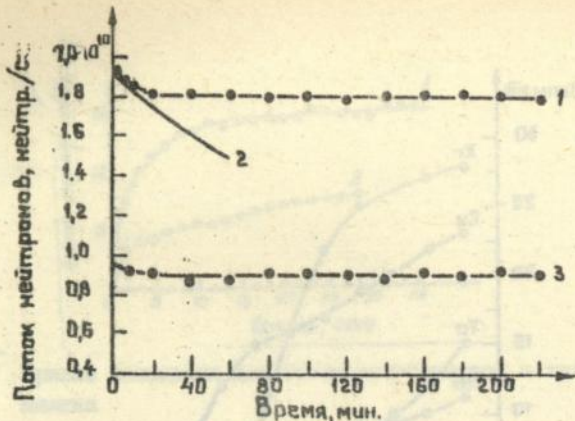


Рис. 8. Зависимость выхода Т-Д нейтронов от времени при бомбардировке мишени из титана смешанным тритий-дейтериевым пучком: 1 - ток ионов 1 мА, отношение трития к дейтерию 1:1; 2 - ток ионов 1 мА, отношение трития к дейтерию 2:3; 3 - ток ионов 0,5 мА, отношение трития к дейтерию 1:1

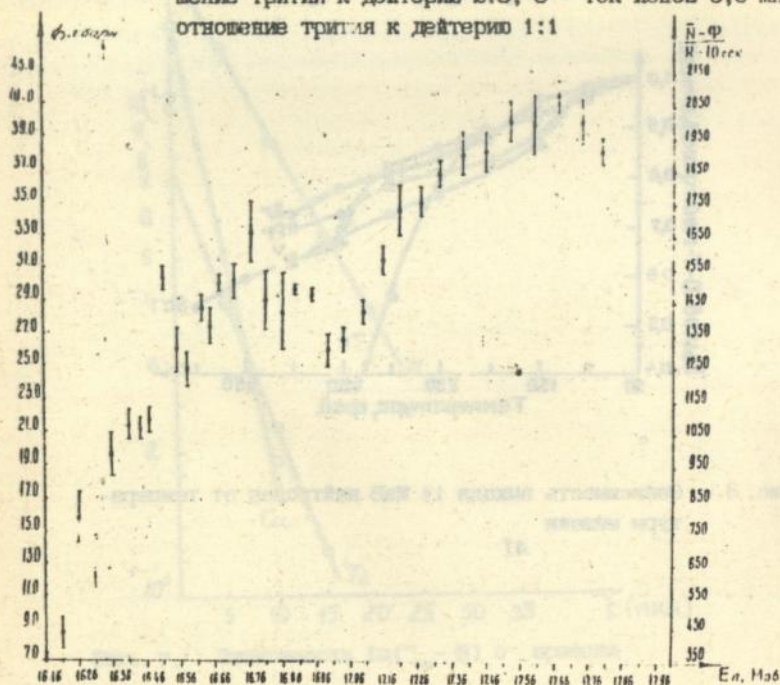


Рис. 10. Функция возбуждения реакции $^{12}\text{C}(n,p)^{11}\text{B}$

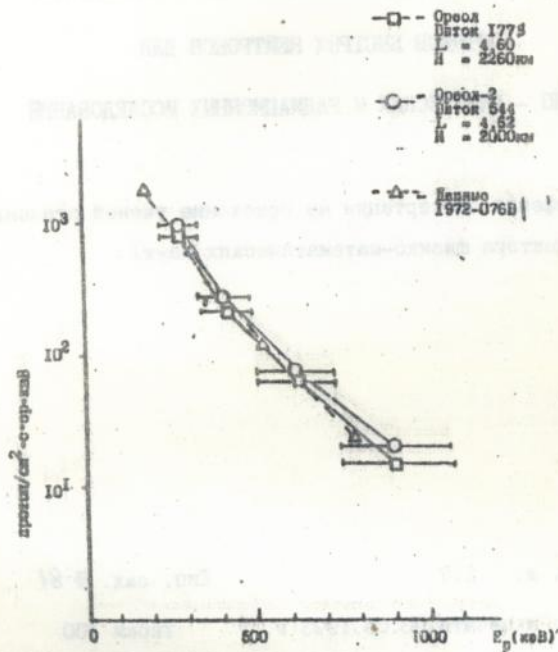


Рис. 11. Спектры протонов в области пояса кольцевого тока по данным спутников "Ореол" и "Ореол-2"

ПРИМЕНКО Георгий Иванович

НЕИЗОТОПНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИНТЕНСИВНЫХ И СТАБИЛЬНЫХ
ПОТОКОВ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ
ЯДЕРНО - ФИЗИЧЕСКИХ И РАДИАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

(Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук)

Усл. печ. л. 2.7

Тип. зах. № 81

Подписано к печати 03.05.1993 г.

Тираж 100

Институт ядерных исследований АН Украины
252028, Киев-28, Пр.Науки, 47

465703

AB 27.460

AB 27.460