

0-361

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

3-88-499

**ОГАНЕЗОВ**      УДК 539.1.08; 589.1.074;  
Григорий Анатольевич      539.12.08; 681.3

**ДИФРАКТОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
С ИСТОЧНИКОМ ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ**

**01.04.01 - экспериментальная физика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Дубна 1988

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени  
Институте физики Академии наук Грузинской ССР.

Научный руководитель - кандидат физико-математических  
наук, старший научный сотрудник  
БЕДБЕНОВ В.С.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических  
наук, профессор, член-корреспон-  
дент АН СССР АБОВ Ю.Г.,  
кандидат физико-математических  
наук, старший научный сотрудник  
БАЛАГУРОВ А.М.

Ведущее предприятие - Физический институт им. П.Н.Лебе-  
дева Академии наук СССР.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1988 года.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1988 года  
в \_\_\_\_ часов на заседании специализированного совета  
Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории  
ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований,  
г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь  
специализированного совета

ТАРАН Ю.В.

Актуальность темы. Нейтроны низких энергий служат мощным  
средством изучения атомной и магнитной структур, упругих и дина-  
мических свойств конденсированных сред. В настоящее время в про-  
водимых исследованиях особенно успешно используются холодные  
нейтроны. Малая энергия ( $E \leq 5 \cdot 10^{-3}$  эВ) и большая длина волны  
( $\lambda \geq 4 \text{ \AA}$ ) таких нейтронов обеспечивают уникальную возможность  
измерения переданных энергии и импульса. Однако существенным  
ограничением широкого применения длинноволновых нейтронов явля-  
ется относительно малая их доля в равновесном тепловом спектре  
ядерных реакторов, что сильно ухудшает отношение полезного сиг-  
нала к фону и создает сложности при анализе экспериментальных  
данных.

В связи с этим, оснащение ядерного реактора источником хо-  
лодных нейтронов (ИХН), формирующим в канале реактора спектраль-  
но чистый пучок холодных нейтронов высокой интенсивности, и со-  
здание на его базе экспериментальных установок, эффективно испо-  
льзующих этот поток, с помощью современных средств автоматиза-  
ции, регистрации и анализа экспериментальных данных, является  
актуальной задачей.

Цель настоящей работы заключается в разработке и создании  
дифрактометрического комплекса с источником холодных нейтронов  
на ядерном реакторе ИРТ-М Института физики АН ГССР, электронной  
аппаратуры и различных методик проведения структурных исследо-  
ваний конденсированных сред, а также системы автоматизации изме-  
рений и обработки данных.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Впервые в практике создания источников холодных нейтро-  
нов в отражателе ядерного реактора создан холодный замедлитель  
большого объема из поликристаллического бериллия с регулируемой  
от 25 до 500 К температурой, обеспечивающий изменение спектра и  
интенсивности нейтронов на выходе канала реактора.

2. На базе ИХН разработана и создана универсальная экспери-  
ментальная установка "СВАН", функционально сочетающая время-про-  
летный спектрометр и классический дифрактометр.

3. Разработан и создан ряд оригинальных технических реше-

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ний и методик проведения измерений на спектрометре "СВАН":

- механическая система модуляции нейтронного пучка короткой длительности;
- модуль ориентации и кистировки исследуемых образцов при температуре жидкого гелия;
- многоканальная система регистрации нейтронов с сопутствующей электронной аппаратурой.

4. Создана автоматизированная измерительно-вычислительная система, выполненная с использованием ЭВМ МЕГА-60, модульной аппаратуры КАМАК и многоканального анализатора ВМ-96, обеспечивающая программное управление ходом проводимых экспериментов и обработку полученных данных.

Практическая значимость диссертации заключается в том, что создание ИХН и комплексной нейтронографической установки, позволяющей использовать все многообразие методов нейтронной оптики, в сочетании с высокой скоростью накопления и обработки экспериментальных данных, широкий диапазон используемых длин волн и переданного импульса, а также большие возможности условий и геометрии проведения эксперимента, позволяют считать такой путь оправданным для большинства лабораторий, не располагающих высокопоточными реакторами, и решать широкий ряд экспериментальных физических задач.

Апробация работ. Материалы диссертации были доложены и обсуждены на следующих конференциях, совещаниях и семинарах: УІ, УІІ, УІІІ и ІХ совещаниях по использованию рассеяния нейтронов в физике твердого тела (Свердловск, 1977, 1981, 1987; Ленинград, 1983; Рига, 1985); УІІІ, Х, ХІ, ХІІ, ХІІІ, и ХІУ всесоюзных совещаниях по координации НИР, выполненных с помощью ядерных реакторов (Алма-Ата, 1974, 1982; Свердловск, 1978; Ташкент, 1980; Томск, 1984; Димитровград, 1986); научных сессиях, конференциях, семинарах ИФ АН ГССР, лаборатории нейтронных исследований ОИАИ и физического института им. П.Н.Лебедева АН СССР; Международной конференции по нейтронной физике (Киев, 1987).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 работ.

Объем работ. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, приложения и списка использованной литературы, включающего 181 наименование. Она содержит 154 страницы машинописного текста, 47 рисунков и 6 таблиц.

Во введении обоснованы актуальность и важность работы, сформулированы ее цели.

В первом разделе дан обзор экспериментальных методов структурной нейтронографии, в частности, рассмотрено современное состояние исследований, проводимых с использованием различных источников нейтронов, аппаратуры, техники и различных методов проведения дифракционных экспериментов. Особое внимание уделено особенностям использования метода времени пролета на стационарных ядерных реакторах. Последняя часть раздела посвящена современным системам регистрации и автоматизации физических экспериментов на базе ЭВМ и модульной электронной аппаратуры.

Во втором разделе описан разработанный и созданный на ядерном реакторе ИРТ-М ИФ АН ГССР источник холодных нейтронов, наличие которого представляет значительные преимущества при проведении структурных и динамических нейтронных исследований различных объектов, независимо от типа реактора и методик проведения измерений. Качество ИХН и характеристики сформированного им нейтронного пучка практически полностью определяются выбором вещества замедлителя и температурой его охлаждения в канале реактора. Известно, что наилучшим холодным замедлителем является жидкий водород, в особенности когда надо обеспечить высокий поток нейтронов с длинами волн, лежащими за пределами когерентных брэгговских эффектов ( $\lambda \sim 10 \text{ \AA}$ ), что обусловлено наличием трансляционных мод, обеспечивающих эффективный сброс энергии в области меньше  $10^{-3}$  эВ. Однако серьезным препятствием практического использования водорода является его взрывоопасность. Помимо этого, из-за строго фиксированной температуры этой криогенной жидкости (20 К), максимум интенсивности нейтронов в спектре термализации находится в диапазоне длин волн 4-6  $\text{ \AA}$  и не может быть смещен в более коротковолновую область спектра. Ясно, что при возможности изменения температуры замедлителя в широком диапазоне можно было бы поддерживать такие ее значения, при которых интенсивность нейтронов с заданной длиной волны в спектре термализации была бы максимальной.

Разработка и создание ИХН с регулируемой температурой холодного замедлителя требует комплексного решения ряда вопросов:

- выбора рабочего вещества холодного замедлителя, формы и геометрии расположения ИХН в канале реактора;
- определения оптимального для термализации нейтронов объема холодного замедлителя и величины тепловыделения в нем;
- разработки и создания рабочей конструкции и системы охлаждения ИХН;
- определения фактора выигрыша нейтронов низких энергий в зависимости от температуры холодного замедлителя и ряда других параметров.

В результате решения вышеперечисленных вопросов был создан ИХН с холодным замедлителем из поликристаллического бериллия, обеспечивающий формирование, получение и вывод из активной зоны нейтронов с энергиями  $E = 10^{-2}$  эВ. В качестве хладагента в ИХН использован газообразный гелий. На рис. 1 приведена принципиальная технологическая схема охлаждения ИХН.

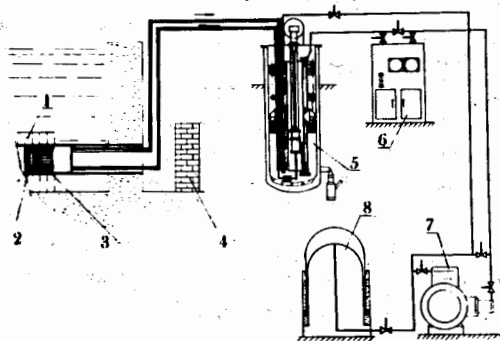


Рис. 1. Технологическая схема охлаждения ИХН: 1 - активная зона ядерного реактора, 2 - криогенная камера ИХН, 3 - бериллиевый замедлитель ИХН, 4 - биологическая защита, 5 - криогенная гелиевая установка КГУ, 6 - блоки очистки и осушки газа, 7 - компрессор, 8 - газгольдер.

Выбор кристаллического замедлителя обусловлен простотой создания вблизи активной зоны реактора взрывобезопасной и надежной в эксплуатации конструкции ИХН с широкими возможностями регулирования температуры замедлителя, начиная с температуры жидкого гелия и выше. Вместе с тем бериллий, обладая хорошими замедляющими способностями и низким сечением поглощения в процессе термализации, обеспечивает накопление длинноволновых нейтронов в области т.н. "когерентных ловушек", при  $5 \cdot 10^{-3}$  и  $8 \cdot 10^{-3}$  эВ. Ниже энергии  $5 \cdot 10^{-3}$  эВ сечение рассеяния бериллия резко уменьшается, что влечет за собой увеличение длины свободного пробега нейтронов, с энергиями меньше брэгговского порога, для которых замедлитель становится прозрачным.

Оптимальный, с точки зрения термализации нейтронов, объем холодного замедлителя был определен путем проведения расчетов на ЭВМ, посредством решения многогруппового кинетического уравнения переноса нейтронов, с учетом реальной геометрии расположения бериллиевой сборки в канале реактора.

Рабочая камера замедлителя представляет собой цельнопрессованную конструкцию из алюминиевого сплава, с выдавленными в ней патрубками для присоединения вакуумированных трубопроводов подачи газообразного гелия от криогенной гелиевой установки КГУ I50/4.5. С целью организации эффективного теплосъема, охлаждаемая сборка замедлителя выполнена в виде плотноупакованной решетки, состоящей из цилиндрических стержней, длина, диаметр и количество которых были определены исходя из условий оптимизации источника с точки зрения термализации нейтронов.

На рис. 2 представлено энергетическое распределение нейтронов в пучке из канала реактора с холодным замедлителем при температуре  $\sim 25$  К. Из кривой видно, что спектр нейтронов из ИХН хорошо следует поведению кривой транспортного сечения  $\sigma_{t2}$  в бериллии (приведенной для сравнения рядом), причем максимумы интенсивности расположены в области "когерентных ловушек", вблизи длин волн 3 и 4 Å. С повышением температуры замедлителя, при  $T \sim 400$  К, эти максимумы сглаживаются, их интенсивность значительно уменьшается, а спектр нейтронов можно аппроксимировать максвелловским распределением при данной температуре.

Охлаждение замедлителя от  $T \sim 400$  К до 25 К приводит к более чем 15-кратному увеличению интенсивности холодных нейтронов

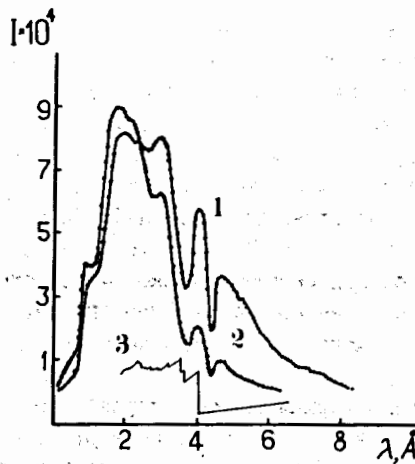


Рис. 2.  
Спектр нейтронов из канала реактора с бериллиевым замедлителем: 1 - 20 К; 2 - 300 К; 3 - транспортное сечение рассеяния для бериллия.

с  $E \approx 5 \cdot 10^{-3}$  эВ на выходе из канала реактора с ИХН и составляет величину  $10^8$  нейтрон/см<sup>2</sup> на каждый МВт мощности реактора.

Бериллиевый замедлитель практически не уступает жидководородному в области длин волн 1-6 Å, однако более эффективен в качестве рабочего вещества ИХН в связи с возможностью изменения температуры твердотельного замедлителя в широком диапазоне, простотой конструкции, надежностью и безопасностью в эксплуатации.

В третьем разделе описан универсальный время-пролетный автоматизированный спектрометр нейтронов "СВАН". Созданная на ядерном реакторе ИРТ-М на базе ИХН установка предназначена для проведения исследований в области физики конденсированных сред, ядерной физики и др. Одной из основных задач является исследование структурных и динамических характеристик кристаллов с дефектами, в частности, исследование кинетики накопления, взаимодействия и образования точечных дефектов и их комплексов, возникающих в кристаллах при облучении или других внешних воздействиях.

Высокая чувствительность метода рассеяния холодных нейтронов применительно к исследованию структурных нарушений и релаксации решетки в кристаллах, подвергнутых радиационной обработке, была показана в простых опытах по пропусканию. В гамма-облучен-

ных (или содержащих заряженную примесь) ионных кристаллах имеет место anomalно сильное рассеяние нейтронов, а из кривых распределения интенсивности диффузного рассеяния вблизи структурных узлов обратной решетки, а также вблизи направления падающего пучка (малоугловое рассеяние), возможно прямое наблюдение структурных дефектов на атомном уровне, получение данных о релаксации решетки, механизмах диффузии и других характеристиках дефектов. Получение этой информации включает предварительное снятие полной нейтронограммы, малоуглового и диффузного рассеяния чистых (не подвергнутых обработке) образцов, для сопоставления с результатами измерений в деформированной решетке. Поэтому при разработке экспериментальной установки одним из основных требований было обеспечение ее универсальности, позволяющей проведение корректного сопоставления результатов измерений, полученных для чистых и облученных образцов, в одной и той же геометрии, с использованием одинокового спектра падающего пучка нейтронов, т.е. обеспечение полностью идентичных условий измерений при постановке эксперимента с использованием различных методов нейтронной оптики. При таком подходе обеспечивается также более рациональное использование дорогостоящего оборудования.

Выполнение условия универсальности достигается созданием на базе ИХН установки с широкими экспериментальными возможностями, позволяющей варьировать спектр и интенсивность падающих на образец нейтронов, с измерением энергетического и углового распределения рассеянных нейтронов большим числом детекторов одновременно. Функционально установка представляет собой комбинацию время-пролетного спектрометра с классическим дифрактометром и обеспечивает работу как в режиме метода времени пролета, так и с использованием метода постоянной длины волны. Создание ИХН и комплексной нейтронографической установки, позволяющей использовать все многообразие методов нейтронной оптики, в сочетании с высокой скоростью накопления экспериментальной информации, широкий диапазон длин волн и переданного импульса, а также большие возможности оптимизации условий и геометрии проведения экспериментов позволяют считать выбранный путь оптимальным и оправданным для большинства лабораторий, не располагающих высокопоточными реакторами специализированного назначения.

В основу создания спектрометра "СВАН" положены принципы,

разработанные в ходе создания комбинированного спектрометра малоуглового и диффузного рассеяния холодных нейтронов, созданного ранее. На этой установке были отработаны подходы как методического, так и конструкционного характера, которые широко были использованы при создании спектрометра "СВАН", что позволило значительно улучшить спектральную чистоту падающего пучка холодных нейтронов, при сохранении высокой светосилы. На рис. 3 приведена принципиальная схема установки "СВАН" с ИХН, расположенной в секторе I-го горизонтального канала реактора ИРТ-М.

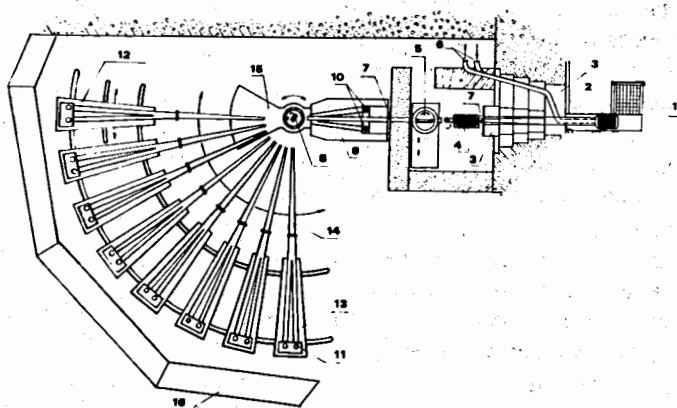


Рис. 3. Принципиальная схема дифрактометрического комплекса с ИХН: 1 - активная зона реактора, 2 - ИХН, 3 - шибера, 4 - бериллиевый фильтр, 5 - селектор нейтронов, 6 - трубопроводы подачи газообразного гелия, 7 - мониторы пучка, 8 - образец, 9 - детекторный блок малой платформы, 10, 11 - детекторы, 12 - блок малоуглового рассеяния, 13 - детекторные блоки большой платформы, 14 - вакуумированные нейтронотводы, 15 - малая платформа, 16 - защита.

Нейтроны из активной зоны реактора I падают на ИХН 2, коллимируются и выводятся через биологическую защиту реактора посредством запирающего устройства (шибера) 3, в последних двух секциях которого расположен съемный конический коллиматор с выходным окном  $30 \times 50 \text{ мм}^2$ . Длина пути нейтронов от камеры ИХН до выхода из биологической защиты составляет 325 см. На выходе из биологичес-

кой защиты, в зависимости от режима работы, устанавливается либо фильтр холодных нейтронов 4 из поликристаллического бериллия, с границей обрезания  $\lambda = 3.96 \text{ \AA}$ , либо механический селектор нейтронов 5. Фильтр и прерыватель могут дистанционно вводиться и выводиться из пучка, что позволяет легко перестраиваться с одного режима работы на другой. Контроль интенсивности нейтронов в пучке осуществляется мониторными детекторами 7. Далее нейтронный пучок падает на образец 8, установленный на встывочном столике. Рассеянные нейтроны регистрируются детекторами 10 и 11, расположенными в защитных детекторных блоках 9, 12 и 13.

Для обеспечения энергетического и углового анализа рассеянных образцов нейтронов установка оснащена двумя поворотными платформами, большой и малой 15, а также автономным блоком малоуглового рассеяния 12. Во избежание рассеяния на воздухе путь нейтронов от ротора прерывателя до места их регистрации полностью вакуумирован с помощью нейтронотводов 14.

Особенностью созданного спектрометра является оснащение его рядом разработанных оригинальных устройств и систем: модуляции нейтронного пучка, ориентации монокристаллических образцов в нейтронном пучке при низких температурах и многоканальной системы регистрации рассеянных нейтронов. Механическая часть спектрометра выполнена в виде массивного основания, с расположенными на нем поворотным столиком модуля образца и двумя поворотными платформами с детекторными блоками. Элементы спектрометра оснащены прецизионными электромеханическими приводами с электронными устройствами управления и автоматики и датчиками измерения угловых величин высокой точности.

Поскольку система формирования и монохроматизации нейтронного пучка практически полностью определяет качество и точность экспериментальных исследований на стационарных ядерных реакторах, проводимых методом времени пролета (МВП), то одним из основных узлов установки является система, предназначенная для формирования периодической, строго регулярной во времени, последовательности нейтронных импульсов короткой длительности, что приводит к необходимости создания высокоскоростных прерывателей нейтронного пучка, с обеспечением высокой степени стабилизации скорости вращения ротора селектора, безопасности и надежности

при длительной эксплуатации в широком диапазоне рабочих скоростей, вплоть до предельных значений, определяемых прочностными характеристиками материала ротора прерывателя. Конструкция прерывателя-монокроматора нейтронного пучка была создана на базе центрифуги отечественного производства ЦВР-1, с использованием некоторых ее узлов и элементов (рис. 4).

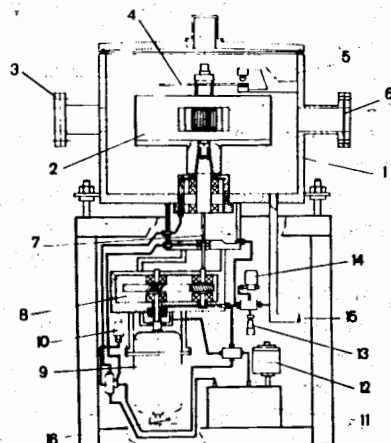


Рис. 4.  
Схематический вид селектора нейтронов:  
1 - рабочая камера,  
2 - ротор, 3 - входное окно, 4, 5 - датчики оборотов, 6 - мембрана, 7 - струна, 8 - редуктор, 9 - двигатель, 10 - датчик давления масла, 11, 12 - маслонасос, 13 - датчик вакуума, 14 - воздушный клапан, 15 - откачка, 16 - тахометр.

При таком подходе создание высокоскоростного селектора нейтронов практически сводится к изготовлению сменных роторов, как с прямыми, так и с криволинейными щелями различных радиусов кривизны, предназначенных для обеспечения эффективного пропускания нейтронов в широком диапазоне длин волн. Разработана технология изготовления таких роторов, включающая создание специальных конструкционных материалов с высокой степенью поглощения нейтронов и гамма-квантов, обладающих необходимой механической прочностью. Конструкции роторов (профили пакета щелей, диаметр и материал) определялись из требований конкретных физических экспериментов и приведены в табл. I.

Устировка монокристалла относительно направления падающего нейтронного пучка заданной плоскостью отражения, в сочетании с необходимостью регулирования температуры в широком диапазоне, начиная от температуры жидкого гелия и выше, является сложной экс-

Таблица I  
Параметры сменных роторов селектора скоростей нейтронов

Основные параметры	Ротор 1	Ротор 2	Ротор 3
Материал	текстолит	орг. стекло	композиционный материал
Диаметр, мм	150	150	200
Толщина, мм	80	80	72
Масса, кг	7	6	10
Площадь пакета, мм <sup>2</sup>	625	1350	1200
Ширина щели, мм	1	2,8	5
Толщина перегородки, мм	1	2,2	1,2
Радиус кривизны, мм	2500	500	прямая щель
Интервал скоростей, мин <sup>-1</sup>	(1,2-12)·10 <sup>3</sup>	(1,2-20)·10 <sup>3</sup>	(1,2-6)·10 <sup>3</sup>
Область энергий, эВ	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>-3</sup>
Степень монохроматизации	80%	20%	-
Разрешение упругого рассеяния	0,012	0,007	0,02-0,08
Соотношение оптимальности	0,005	0,01	-

периментальной задачей. Создана конструкция модуля устировки и ориентации образцов на выведенном нейтронном пучке, в диапазоне температур 4,2-500 К. Модуль образца (рис. 5) состоит из гелиевого криостата со сменными держателями образцов, гониометрических приставок, массивного устировочного стола, подъемного устройства и узла стыковки поворотного стола с криостатом, обеспечивающего их соосное вращение. Держатель образцов гелиевого криостата позволяет устанавливать в холодной камере до трех образцов одновременно, с возможностью попеременного введения образца в коллимированный пучок, путем вертикального перемещения криостата подъемным устройством, что обеспечивает проведение цикла измерений без разгерметизации рабочей камеры криостата.

Регулирование температуры образца в криостате от температуры 4,2 до 500 К (с точностью фиксации до 0,1 К) осуществляется автоматической системой регулирования. Для этого в конструкцию держателя включены специальные температурные ключи, обеспечиваю-

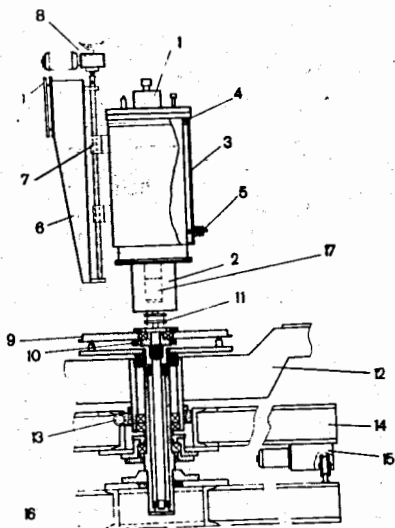


Рис. 5.

Принципиальная схема модуля юстировки и ориентирования образца: 1 - гелиевый криостат, 2 - рабочая камера с держателем образцов, 3 - корпус держателя, 4 - опорный подшипник, 5 - фиксатор, 6 - кронштейн, 7 - винтовая передача, 8 - электропривод с редуктором, 9 - поворотный столик, 10 - привод столика, 11 - механизм сцепления, 12 - малая платформа спектрометра, 13, 15 - приводы платформ, 14 - большая платформа спектрометра, 16 - рама спектрометра, 17 - держатель образцов.

щие (за счет изменения теплопроводности) коммутацию режимов охлаждения и нагревания. Процесс автоматического коммутирования режимов откачки и напуска газообразного гелия в температурных ключах, регулирование температуры во всем диапазоне обеспечиваются электронной системой, собранной в стандарте КАМАК.

При проведении измерений при комнатных температурах имеется возможность установки на юстировочном столике гониометрической головки рентгеновского дифрактометра, оснащенной миниатюрными электроприводами для дистанционного управления.

Рассеянные нейтроны регистрируются многоканальной системой детектирования, созданной на базе пропорциональных  $He^3$ -счетчиков типа СММ-17 и СММ-18. Размещенные в защитных коробах счетчики установлены на двух вращающихся платформах с общей осью вращения и пролетных базах 3,06 и 5,5 м соответственно. Каждый счетчик нейтронов оснащен типовой электронной схемой формирования импульсов, конструктивно выполненной в виде отдельных модулей. Максимальное число каналов регистрации 32. С целью повышения эффективности и надежности проводимых измерений создана электронная автоматизированная система диагностики спектрометрических каналов регистрации, основанная на регистрации и анализе прохождения стандар-

тного сигнала с генератора по всем каналам и выполненная из типовых модулей КАМАК.

Малая поворотная платформа с детекторами предназначена для получения экспресс-информации при проведении исследований поли- и монокристаллов и для работы в геометрии обратного рассеяния; радиус плеча 1,1 м, вращение осуществляется в диапазоне углов  $0^{\circ}$ - $360^{\circ}$  со скоростью одной угловой минуты в сек. Для измерения величины угла поворота использован датчик углов ротационного типа IGR, точность измерения  $\pm 1$  угл. мин. Геометрия расположения счетчиков в детекторном модуле малой платформы видна на рис. 2.

Большая поворотная платформа предназначена для проведения измерений по пропусканию, дифракции, малоугловому и диффузному рассеянию с большей точностью; радиус плеча 3,5 м, диапазон вращения  $0^{\circ}$ - $120^{\circ}$ . На ней установлены 8 детекторных коробов с 16 счетчиками, которые могут быть разнесены друг от друга произвольным образом. Каждый детекторный модуль большой платформы содержит два одноцелевых коллиматора, покрытых изнутри кадмиевой пластиной, с целью исключения зеркально отраженных под малыми углами нейтронов, два счетных канала со счетчиками, с полезной площадью регистрации  $20 \times 120 \text{ мм}^2$  каждый, установленные в вакуумированной камере симметрично друг относительно друга с угловым шагом  $20^{\circ}$ , а также охлаждаемый до температуры жидкого азота фильтр из поликристаллического бериллия, используемый в экспериментах по диффузному рассеянию. Один из детекторных блоков на большой платформе предназначен для измерения спектра падающих на образец нейтронов и снабжен автономной системой угловых перемещений, а также для анализа интенсивности малоуглового рассеяния в диапазоне углов  $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$ .

Для определения угловых положений детекторных блоков на большой платформе, а также их юстировки, используется оптико-механическая система. Работа этой системы основана на принципе слежения за отраженным лучом лазера (типа ЛП-72) от зеркала, установленного под заданным углом и расположенного на столике образца; достигаемая точность измерения углов при этом  $\pm 1$  угл. мин.

Наличие большого количества экспериментальных устройств, требующих дистанционного управления непосредственно на нейтронном пучке ядерного реактора, необходимость контроля за работой десятка датчиков, большой поток экспериментальной информации, поступающей по многим каналам одновременно, и желание обеспечить



соизмеримую скорость приема, накопления и обработки данных потребовали создания автоматизированной системы с развитым программным и аппаратным обеспечением, описанию которой посвящен четвертый раздел диссертации. Система автоматизации создана на базе ЭВМ MERA-60, многомерного временного анализатора ВМ-96 (ИНТЕРТЕХНИК) и модульной аппаратуры КАМАК. Она представляет собой совокупность автономных подсистем: регистрации и накопления спектрометрической информации, регулирования и стабилизации скорости вращения селектора нейтронов, управления спектрометром, измерения и контроля параметров экспериментального оборудования и вывода информации.

На рис. 6 представлена блок-схема конфигурации системы автоматизации дифракционного комплекса. Регистрация и накопление экспериментальной информации осуществляются промежуточным накопителем, созданным на базе многомерного анализатора, программно управляемого ЭВМ, что, с одной стороны, предоставляет ряд дополнительных удобств и возможностей при проведении длительных экспериментов, значительно повышает надежность работы комплекса, а с другой позволяет гораздо эффективнее использовать ЭВМ, практически полностью освободив ее от операторного накопления больших массивов данных, поступающих в виде временных спектров по многим каналам одновременно.

Для регулирования стабилизации скорости вращения ротора селектора нейтронов, в широком диапазоне скоростей с высокой точностью, созданы устройства на базе модульной аппаратуры КАМАК. Система управления обеспечивает питание привода, управления селектором в ручном и автоматическом режимах, контроль за состоянием параметров отдельных механических узлов, а также ступенчатое регулирование оборотов ротора по команде с ЭВМ. Система стабилизации реализуется при активном участии ЭВМ, при этом управление селектора осуществляется по алгоритму "измерение-анализ-управление". Кроме того, имеется автономная система стабилизации, основанная на принципе фазового сравнения частоты вращения ротора с частотой опорного генератора. Достижимая точность стабилизации в обоих режимах  $10^{-2}-10^{-4}\%$ , в рабочем интервале оборотов  $10^3-2 \cdot 10^4 \text{ мин}^{-1}$  соответственно.

Создание системы автоматизации потребовало разработки ряда новых электронных устройств в стандарте КАМАК (кодировщика номера детектора, блока управления многоканального анализатора, кодировщика адреса и др.), использование которых обеспечило прове-

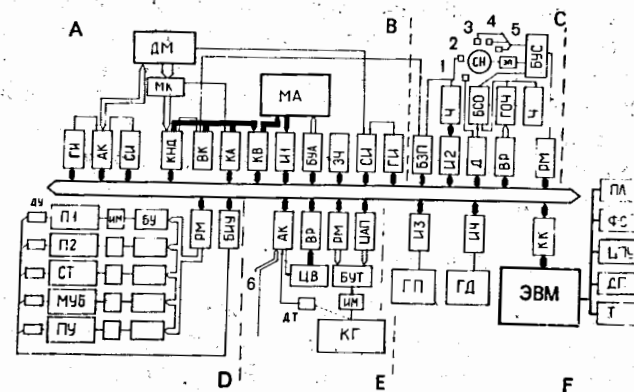


Рис. 6. Блок-схема измерительного модуля: ДМ - детекторный модуль, МК\* - механический коммутатор, МА - многоканальный анализатор, ГИ - генератор импульсов, АК - аналоговый коммутатор, СИ - счетчик импульсов, КИД\* - кодировщик номера детектора, ВК - временной кодировщик, КА\* - кодировщик адреса, КВ\* - коммутатор входов, ИИ-4\* - интерфейсы, БУА\* - блок управления анализатора, ЭЧ - блок электронных часов, БЗП\* - блок задержки программируемый, Д - делитель, Ч - частотомер, БСО\* - блок стабилизации оборотов, ГОЧ - генератор опорной частоты, ВР - входной регистр, РМ - релейный мультиплексор, ДУ - датчик углов, СН - селектор нейтронов, П1-2 - платформы, СТ - столик образца, МУБ - малоугловой детекторный блок, ПУ - подъемное устройство, БИУ\* - блок измерения углов, ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь, ЦВ - цифровой вольтметр, БУТ\* - блок управления температуры, ИМ - исполнительный механизм, КГ - криостат гелиевый, ДТ - датчик температуры, ГП - графопроектор, ГД - графический дисплей, КК - кредит-контроллер, ПЛ - перфоратор ленточный, ФС - фото-считыватель, ШПУ - цифро-печатающее устройство, ДП - дисковая память, Т - терминал, 1, 2 - датчики оборотов, 3, 7 - датчики температуры, 4 - датчик давления, 5 - датчик вакуумный, 6 - датчик номера образца (выделенные "\*" блоки разработаны и изготовлены в ИФ АН ГССР).

дение различных режимов измерений на установке.

Управление комплексом, измерение и контроль параметров экспериментального и технологического оборудования обеспечиваются разработанной программой LINA для текущего состояния системы. Программа позволяет на ЭВМ MERA-60 реализовать управление ходом эксперимента в реальном масштабе времени, во всех режимах работы экспериментального дифрактометрического комплекса. Программа

LINA представляет собой интерпретатор команд, выполненных в виде диспетчера последовательности команд, составляющих программу эксперимента, позволяет производить управление параметрами модулей КАМАК, прием и накопление спектрометрической и служебной информации, запись ее на дисковую память, предварительную математическую обработку накопленных данных и вывод на терминалы информации в виде таблиц и графиков.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Для получения, формирования и вывода из канала реактора спектрально чистого, интенсивного пучка длинноволновых нейтронов в отражателе ядерного реактора ИРТ-М Института физики АН СССР разработан и создан источник холодных нейтронов с регулируемой в диапазоне 25-500 К температурой замедлителя. Показано, что использование кристаллического бериллия в качестве рабочего вещества холодного замедлителя приводит более чем к 15-кратному выигрышу интегральной интенсивности нейтронов с энергией  $5 \cdot 10^{-3}$  эВ и ниже при охлаждении замедлителя до температуры  $\sim 25$  К. Созданная конструкция ИХН и технологическая схема охлаждения, основанная на циркуляции в замкнутом контуре газообразного гелия, обеспечивает простоту, надежность и безопасность эксплуатации ИХН в целом.

2. На базе ИХН разработана и создана эффективная универсальная экспериментальная установка с многодетекторной системой регистрации, предназначенная для исследования структуры вещества на атомном уровне с использованием различных методов нейтронной оптики - дифракции, малоуглового и диффузного рассеяний.

3. Создана конструкция высокоскоростного механического прерывателя-монокроматора нейтронов со сменными роторами. Разработана технология изготовления роторов прерывателя.

4. Разработана и создана система автоматического регулирования скорости вращения ротора прерывателя нейтронного пучка, с точностью стабилизации  $10^{-2}\%$ .

5. Разработан и создан модуль юстировки и ориентации монокристаллов относительно направления нейтронного пучка при температуре жидкого гелия.

6. Разработана и создана многоканальная система регистрации нейтронов, оснащенная диагностикой спектрометрических каналов в стандарте КАМАК.

7. Создана система измерения угловых и линейных перемещений механических узлов спектрометра.

8. Разработаны и созданы электронные блоки в стандарте КАМАК: многофункциональный кодировщик номера детектора, кодировщик адреса и блок управления многоканального анализатора.

9. На базе ЭВМ MERA-60, аппаратуры КАМАК и многоканального анализатора разработана и создана система автоматизации дифрактометрического комплекса, оснащенная развитым программным обеспечением, обеспечивающая управление ходом проводимых измерений во всех режимах работы: накопление и обработку экспериментальных данных и контроль параметров технологического оборудования.

10. Экспериментальные исследования, проведенные на дифрактометрическом комплексе с источником холодных нейтронов в период 1985-87 гг., выявили высокую надежность эксплуатации установки и подтвердили правильность выбранных технических решений.

#### Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бедбенев В.С., Оганезов Г.А. Экспериментальное изучение атомной конфигурации дефектов решетки в опытах по рассеянию длинноволновых нейтронов // Электронные и ионные процессы в твердых телах.-Тбилиси: Мецниереба. 1979.-Вып.10.-С.53-64.
2. Бедбенев В.С., Оганезов Г.А. Комбинированный спектрометр малоуглового и диффузного рассеяния холодных нейтронов // ПТЭ.-1982.-№6.-С.28-31.
3. Система автоматизации дифрактометрического комплекса с холодным замедлителем / Оганезов Г.А., Бедбенев В.С., Джагаров А.Г., Старова Л.Ю.// Тбилиси, 1987.-23 с.-(Препринт/Институт физики АН СССР).
4. Бедбенев В.С., Микеров В.И., Оганезов Г.А. Дифрактометрический комплекс с источником холодных нейтронов.-Москва, 1987.-30 с.-(Препринт/Физический институт им. П.Н.Лебедева АН СССР, №318).
5. Лиронкин Г.Ф., Оганезов Г.А. Многофункциональный кодировщик номера детектора.-Дубна, 1987.-5 с.-(Препринт/ОИЯИ, №13-87-628); ПТЭ,-1988.-№2.-С.215.

6. Джагаров А.Г., Оганезов Г.А. Блок управления многоканального анализатора//ПТЭ.-1988.-№2.-С.212.
7. Оганезов Г.А., Бедбенев В.С. Кодировщик адреса//ПТЭ.-1988.-№2.-С.215.
8. А.с. 1395000(СССР). Материал для ротора-монохроматора-селектора скоростей холодных нейтронов / Рустамбеков В.А., Бедбенев В.С., Оганезов Г.А. - Оpubл. в Б.И., 1988, № 17.

Рукопись поступила в издательский отдел  
6 июля 1988 года.