

Федеральное агентство научных организаций

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук  
(ИЯИ РАН)

№ госрегистрации:  
АААА-А17-117101640024-1

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИЯИ РАН  
член-корреспондент РАН



Л.В. Кравчук

29.12.2017

ОТЧЁТ

### О ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТАХ

«Поддержка и развитие центров коллективного пользования научным оборудованием для обеспечения реализации приоритетов научно-технологического развития в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по теме:

**МОДЕРНИЗАЦИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ НОВЫХ ОБРАЗЦОВ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ЦКП. УВЕЛИЧЕНИЕ ЭНЕРГИИ УСКОРЕННОГО ПУЧКА.**

(промежуточный)

Этап 1

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»

Соглашение о предоставлении субсидии от 28.08.2017 № 14.621.21.0014

Руководитель работы  
Директор ИЯИ РАН  
член-корреспондент РАН

Л.В.Кравчук

Москва 2017

## РЕФЕРАТ

Отчет 91 с., 1 ч., 35 рис., 5 табл., 11 источников  
ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ИОНОВ ВОДОРОДА, СИСТЕМА ВЧ ПИТАНИЯ,  
КЛИСТРОНЫ, ГЕНЕРАТОРНЫЕ ЛАМПЫ, РАДИОИЗОТОПНЫЙ  
КОМПЛЕКС, КОМПЛЕКС ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ, ИМПУЛЬСНЫЙ  
ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ

Объектами исследования в данной работе являются Центр коллективного пользования Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) «Ускорительный центр нейтронных исследования структуры вещества и ядерной медицины» в составе:

- Линейный ускоритель ионов
- Импульсный источник нейтронов;
- Изотопный комплекс;
- Комплекс протонной терапии.

Основной целью данной работы в рамках Соглашения является «Поддержка и развитие центров коллективного пользования научным оборудованием для обеспечения реализации приоритетов научно-технологического развития в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»

Метод проведения работы - разработка и согласование технических заданий на приобретаемые элементы оборудования, контроль качества изготовления, приемка изготовленного оборудования в сочетании с экспериментальными испытаниями в рабочих условиях.

Результаты работы заключаются в модернизации оборудования ускорителя и главных экспериментальных установок ЦКП – изотопного комплекса, нейтронного источника и комплекса протонной лучевой терапии,

что позволит заметно повысить надежность работы комплекса в целом, расширить круг решаемых научно-исследовательских задач.

Анализ и практическая реализация этой задачи по системам и установкам ЦКП позволят повысить качество и надежность работы ЦКП ИЯИ РАН в планируемых научных сеансах. Проведенные исследования режимов работы создаваемых систем, новые электронные компоненты, технологические разработки могут найти практическое применение на аналогичных установках.

Область применения результатов работы – ядерно-физические установки – ускорители заряженных частиц, нейтронные комплексы, установки по развитию методов ядерной медицины – изотопные технологии и технологии лучевой терапии.

Информация о результатах выполненной работы размещена на сайте ЦКП «Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины» [www.inr.ru/ckp/](http://www.inr.ru/ckp/)

<b>Содержание</b>		
	Введение.....	8
1	Изготовление оборудования к элементам и подсистемам модернизируемой приборно-аналитической базы ЦКП.....	9
1.1	Восстановление работоспособности и модернизация ВЧ системы основной части ускорителя до энергии 267 МэВ.....	9
1.2	Изготовление опытной партии модернизированных генераторных ламп с целью обеспечения их применения в качестве модуляторных ламп....	17
1.3	Автоматизированная система перемещения 2-координатного детектора нейтронов установки Горизонт.....	33
1.4	Система автоматизации и мониторинга установки «Геркулес».....	38
1.5	Устройства высокого давления для нейтронных, синхротронных, мёссбауэровских и рентгеновских исследований, изготовление оборудования.....	39
1.6	Модернизация протонной лучевой установки, включая систему позиционирования пациента.....	49
1.7	Оборудование участка диффузионной сварки для производства ториевых мишеней в металлических оболочках.....	55
2	Реализация мероприятий по развитию ЦКП.....	78
	Заключение.....	86
	Список использованных источников.....	90

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящем отчете о выполненных работах на этапе № 1 Соглашения о предоставлении субсидии применяют следующие термины, обозначения и сокращения с соответствующими определениями:

ВЧ	Высокочастотный (канал, прибор, лампа)
АРФА	Автоматическая регулировка фазы и амплитуды поля в ускоряющих резонаторах
АРЧТ	Автоматическая регулировка частоты температурой в ускоряющих резонаторах
ПЧД	Позиционно- чувствительный детектор
ВТСП	Высокотемпературная сверхпроводимость
КПТ ИЯИ РАН	Комплекс протонной терапии ИЯИ РАН
ИФЛ	искусственная формирующая линия
КВТМ	высоковольтный выпрямитель
ВНВ	вакуумный выключатель
ИР	индукционный регулятор высокого напряжения
ПРИЗ	Система защиты от пробоев- прерывание и защита (в системе ВЧ питания ускорителя)
СВЧ	Сверхвысокочастотный
ВВ	высоковольтный
TDC	Time-Digital Converter (преобразователь время-цифра)
ИТ	Импульсный трансформатор

## **Введение**

На площадке Института ядерных исследований РАН (г. Троицк, Москва) находится один из крупнейших в России ядерно-физический комплекс, в состав которого входят уникальные, единственные в России ядерно-физические установки, такие как крупнейший в России сильноточный линейный ускоритель протонов, импульсный источник нейтронов, радиоизотопный комплекс и комплекс лучевой терапии. Некоторые из этих научных установок являются единственными на территории России, на которых осуществляется международное сотрудничество на основе межправительственных соглашений и научных программ в области научно--технического сотрудничества, по которым Россия несет определенные обязательства.

Наряду с исследованиями в области физики элементарных частиц и ядерной физики, ядерно-физический комплекс ИЯИ РАН в г. Троицке обеспечивает проведение широкомасштабных прикладных исследований с целью полного обеспечения потребности отечественной и мировой медицины в специальных медицинских радиоизотопах и средствах лучевой радиотерапии социально значимых (онкологические и сердечно-сосудистые) заболеваний, комплексных исследований по безопасной ядерной энергетике, экологии, нанотехнологиям и созданию материалов с заранее заданными свойствами.

Исследования на ускорительном комплексе ИЯИ РАН и на главных экспериментальных установках – Импульсный источник нейтронов, Изотопный комплекс, Комплекс протонной лучевой терапии - ведутся в режиме Центра коллективного пользования большими коллективами ученых и специалистов ФАНО России, Российской академии наук, Минобрнауки России, Минатома России, высшей школы и других ведомств в соответствии с межведомственными планами и программами.

# **1 Изготовление оборудования к элементам и подсистемам модернизируемой приборно-аналитической базы ЦКП.**

## **1.1 Восстановление работоспособности и модернизация ВЧ системы основной части ускорителя до энергии 267 МэВ.**

Система высокочастотного (ВЧ) питания основной части линейного ускорителя протонов предназначена для создания мощных электромагнитных полей, стабильных по частоте, амплитуде и фазе в ускоряющих резонаторах основной части линейного ускорителя, работающая на частоте 991 МГц, и обеспечивает ускорение пучка заряженных частиц до энергии 600 МэВ. В системе ВЧ-питания основной части ускорителя используются 28 основных ВЧ каналов возбуждения резонаторов, разделенных на три сектора (10, 9, и 9 каналов), и по одному резервному каналу в каждом секторе, а также разветвленную волноводную систему с клистронными и резонаторами гермоокнами, направленными ответвителями, гибкими секциями, волноводными переключателями и ферритовыми вентилями. Клистронные усилители мощности ВЧ каналов питаются от импульсных модуляторов и их мощность должна быть достаточна для создания ВЧ полей в резонаторах, необходимых для ускорения пучка заряженных частиц.

В настоящее время, из-за отсутствия достаточного количества клистронов КИУ-40М, система ВЧ питания основной части линейного ускорителя обеспечивает ускорение пучка протонов длительностью импульса 200 мкс и с частотой повторения 50 Гц в диапазоне энергий от 100 до 209 МэВ. Для получения энергии пучка 267 МэВ требовалось изготовить два клистрона КИУ-40М, а также провести работы по восстановлению работоспособности и модернизации 3-х ВЧ каналов № 3-10, 3-11 и 4-1. Для реализации этой задачи необходимо выполнить монтажные, ремонтные, наладочные работы, изготовить два клистрона КИУ-40М и приобрести материалы, комплектующие изделия, которые необходимы в процессе выполнения работ.

В результате выполнены следующие работы:

1. Заключен договор с заводом-изготовителем на изготовление и поставку клистронов КИУ-40М в количестве 2-х штук.
2. Проверка состояния волноводно-фидерной системы, замена неисправных элементов на каналах № 3-10, 3-11, 4-1.
3. Ремонт оборудования, проведение профилактических и регламентных работ, протяжка контактов наконечников в/в и н/в силовых кабелей, доливка трансформаторного масла в масляные устройства на каналах № 3-10,3-11, 4-1.
4. Ремонт и наладка радиоэлектронных шкафов и отдельных узлов оборудования каналов № 3-10, 3-11, 4-1.
5. Монтаж клистронов, КИУ-40, находящихся в настоящее время в эксплуатации, для проведения наладочных работ на каналах № 3-10,3-11, 4-1.
6. Наладка оборудования ВЧ каналов № 3-10,3-11, 4-1 при работе на эквивалент нагрузки генератора.
7. Калибровка приборов, проверка, настройка защит каналов № 3-10, 3-11, 4-1.
8. Модернизация оборудования каналов № 3-10,3-11,4-1 в объеме, который выполнен на каналах № 3-1...3-9, а именно:
  - удлинение формирующих линий модулятора;
  - изготовление катодного модулятора и в/в источника питания шкафа предварительного усилителя клистрона;
  - доработка блоков поджига тиристорных ключей модулятора с целью повышения помехозащищенности оборудования;
  - доработка схемы защиты формирующих линий модулятора от перенапряжения;
  - доработка высоковольтных масляных блоков модулятора для повышения надежности работы оборудования;
  - доработка ячейки контроля напряжения и тока накала для клистронов с новой катодной пушкой;



- изготовление ячеек быстрого аварийного выключения ВЧ поля в ускоряющих резонаторах;

- модернизация систем АРФА и АРЧТ.

9. Тренировка резонаторов каналов № 3-10, 3-11, 4-1 от лабораторного СВЧ генератора до уровня, равного номинальному полю в резонаторе.

10. Комплексная настройка каналов № 3-10, 3-11, 4-1 при работе на ускоряющие резонаторы совместно с системами АРФА и АРЧТ.

11. Проверка их работы в составе каналов № 3-10, 3-11 на ускоряющие резонаторы совместно с системами АРФА и АРЧТ.

После проведения вышеуказанных работ были получены следующие основные выходные параметры ВЧ каналов № 3-10, 3-11, 4-1, которые представлены в таблице 1:

Основные выходные параметры ВЧ каналов № 3-10, 3-11, 4-1.

Параметры	Каналы		
	3-10	3-11	4-1
Анодное напряжение клистрона	52,5 кВ.	51 кВ.	60 кВ.
Длительность в/в импульса модулятора, мкс.	240	230	230
Неравномерность плоской части модулирующего импульса клистрона, не более	±1,5 %	±1,5 %	±1,5 %
Длительность импульса огибающей ВЧ поля в резонаторе, мкс.	214	200	200
Длительность стабилизированного импульса ВЧ поля в резонаторе, мкс.	203	194	200
Стабильность ВЧ поля в резонаторе с включенными обратными связями АРФА, не более	1 %	1%	1%
Стабильность температуры резонатора, обеспечиваемая системой АРЧТ, не более	1 <sup>0</sup> С	1 <sup>0</sup> С	1 <sup>0</sup> С

Осциллограммы основных выходных параметров ВЧ каналов № 3-10, 3-11, 4-1 представлены на рисунках 1, 2, 3, 4, 5, 6.

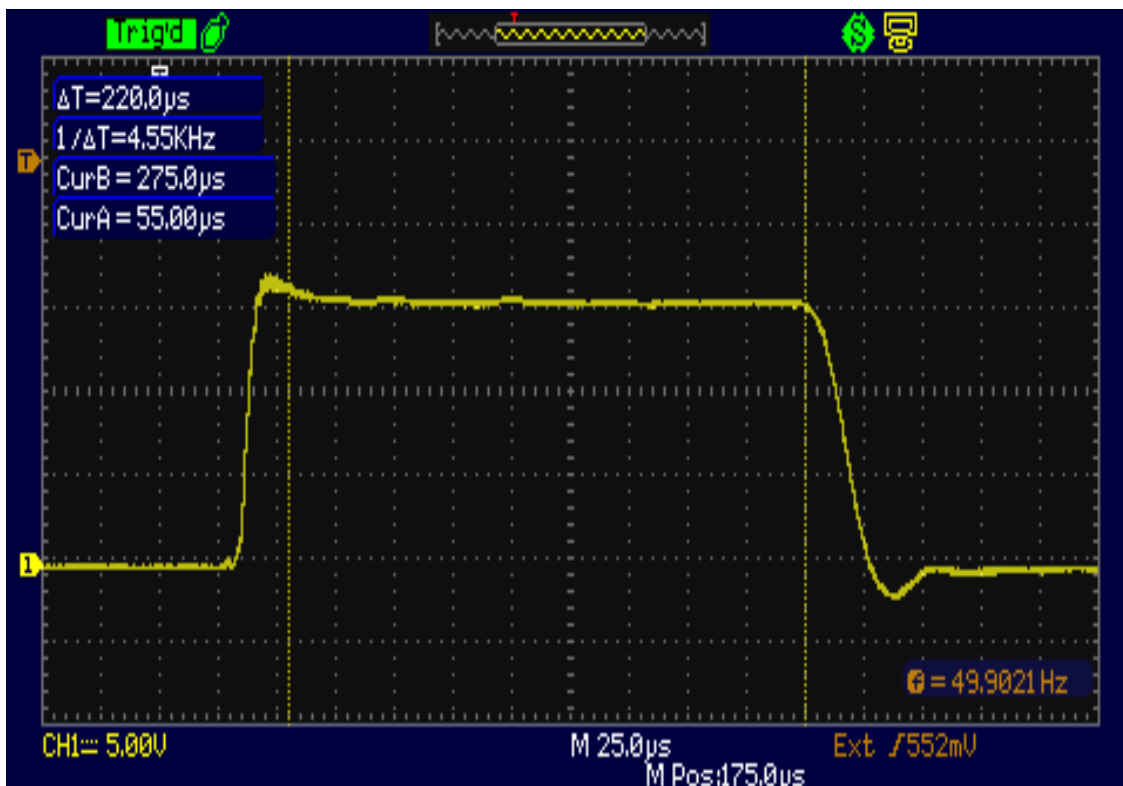


Рисунок 1 - Импульсный ток клистрона канала № 3-10

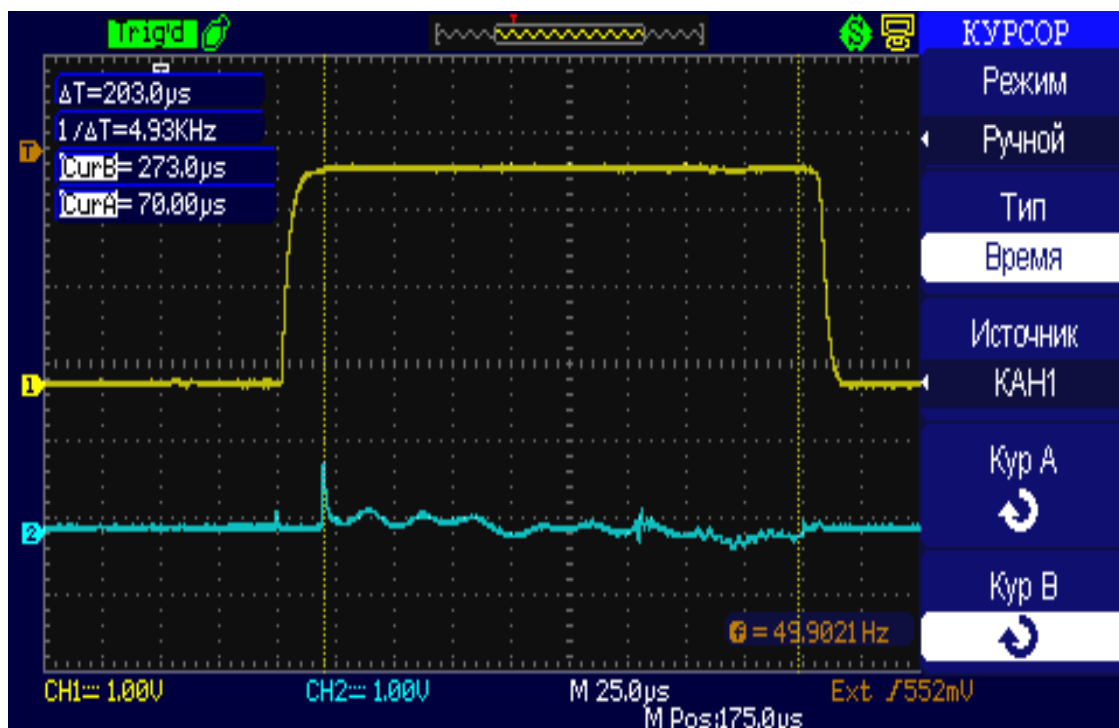


Рисунок 2 - Огибающая импульса стабилизированного ВЧ поля в резонаторе и сигнал ошибки по амплитуде системы АРФА канала № 3-10

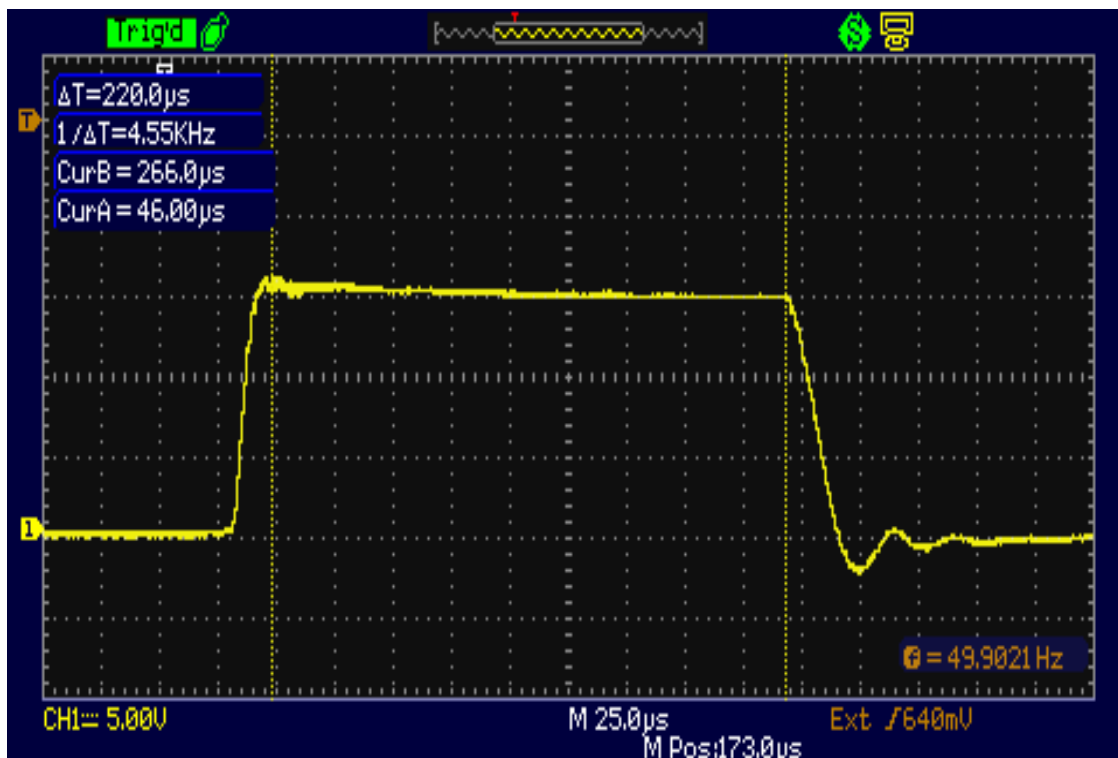


Рисунок 3 - Импульсный ток клистрона канала № 3-11

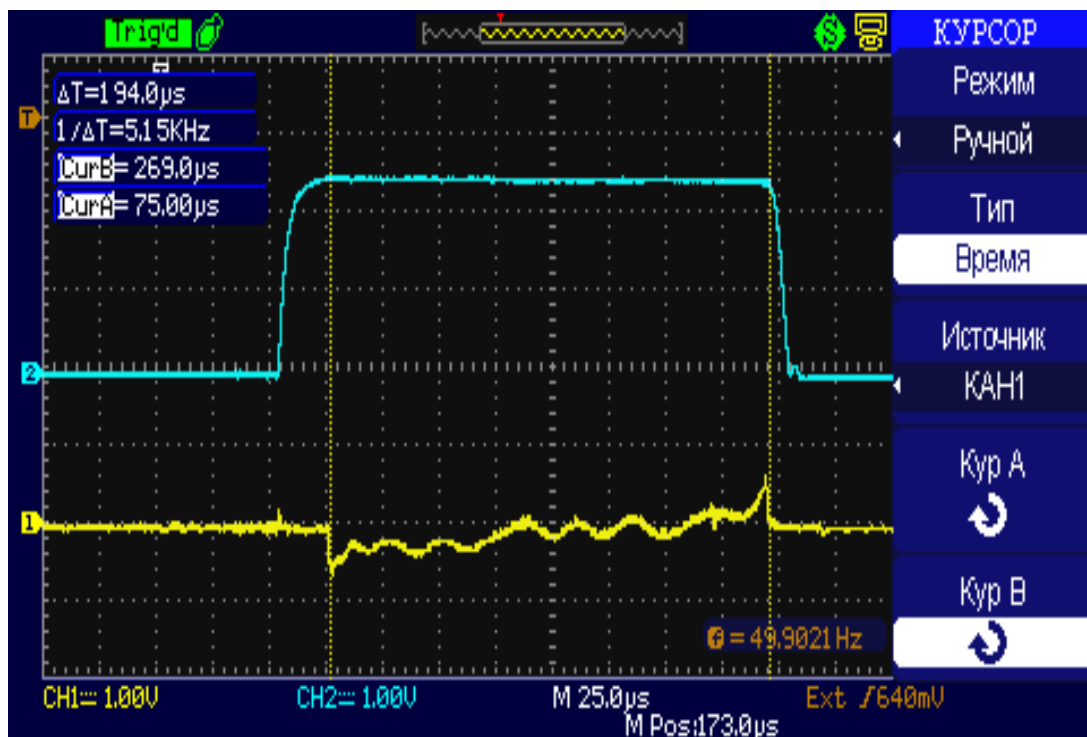


Рисунок 4 - Огибающая импульса стабилизированного ВЧ поля в резонаторе и сигнал ошибки по амплитуде системы АРФА канала № 3-11

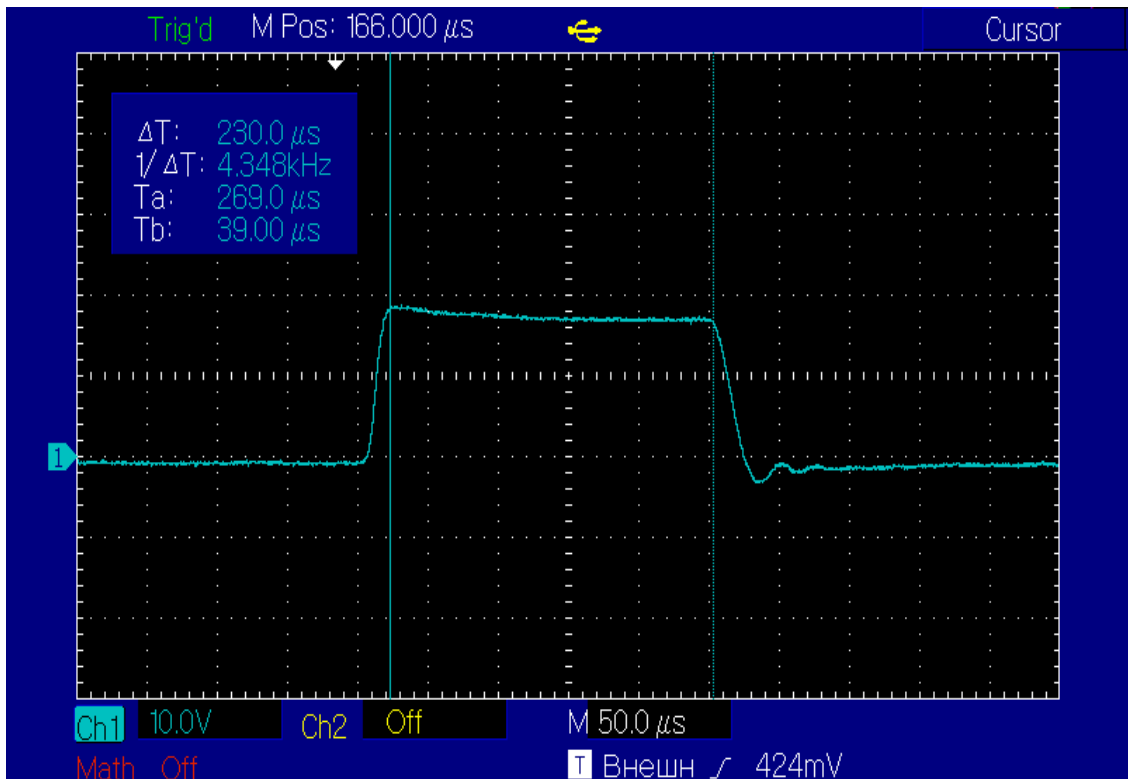


Рисунок 5 - Импульсный ток клистрона канала № 4-1

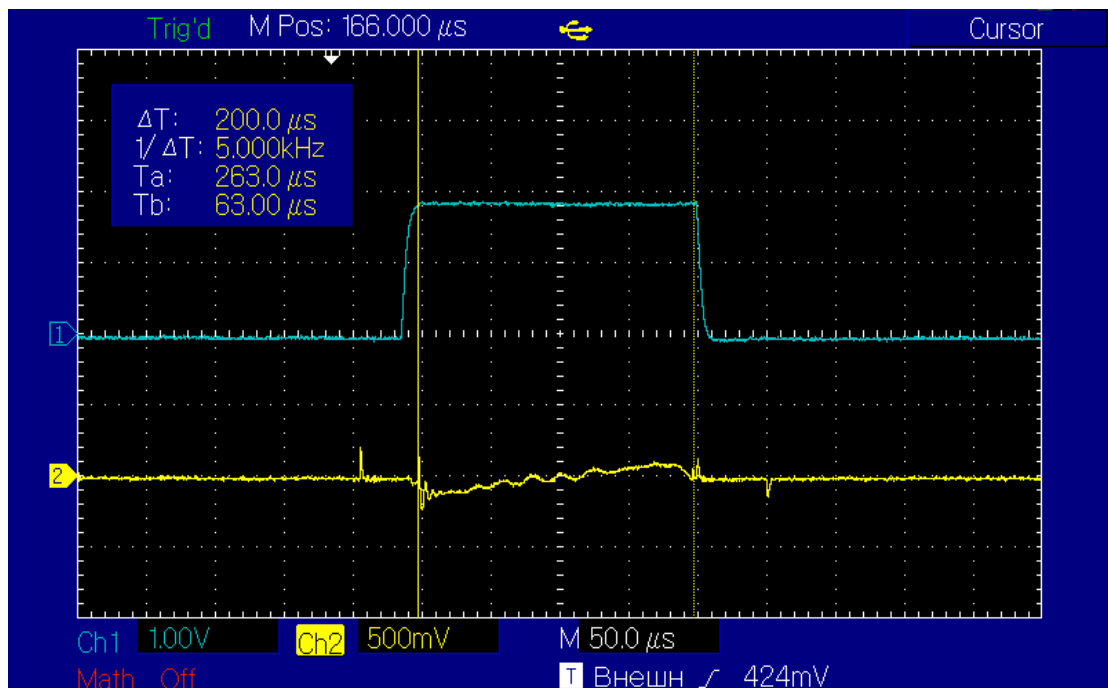


Рисунок 6 - Огибающая импульса стабилизированного ВЧ поля в резонаторе и сигнал ошибки по амплитуде системы АРФА канала № 4-1

После проведения модернизации оборудования каналов № 3-10,3-11 и 4-1 были достигнуты следующие результаты:

1. Путем удлинения формирующих линий модуляторов на пять LC звеньев длительность плоской части высоковольтного импульса была увеличена с 170 до 230 мкс с неравномерностью вершины равной  $\pm 1,5\%$ .
2. Переделка предварительного усилителя клистрона, суть которой заключалась в изменении способа импульсной модуляции СВЧ триодов усилителя с анодной на катодно-сеточную модуляцию, позволила увеличить длительность огибающей ВЧ импульса на входе клистрона с 140 до 250 мкс., а также:
  - повысить надежность в работе предварительного усилителя;
  - снизить импульсное напряжение с 3 кВ до 50 В;
  - повысить КПД усилителя;
  - повысить стабильность амплитуды импульсов и исключить зависимость ее от частоты повторения;
  - исключить пробой изоляционных прокладок конструктивных конденсаторов СВЧ триодов усилителя;
  - получить практически идеальную прямоугольную форму ВЧ импульса с крутыми передним и задним фронтами.
3. Доработка блоков поджига тиристорных ключей модулятора обеспечила повышение надежности и помехозащищенности в работе модулятора.
4. Доработка схемы защиты формирующих линий модулятора от перенапряжения позволила защитить дорогостоящие усилительные клистроны, а также высоковольтные узлы модулятора от преждевременного выхода из строя и позволила существенно сократить время простоя линейного ускорителя в сеансах по ускорению пучка.
5. Замена изолирующих держателей проволочных резисторов высоковольтных масляных блоков модулятора существенно повысила их надежность в работе.

6. Доработка ячейки контроля тока и напряжения клистрона позволила использовать их для работы с клистроном с новыми катодными пушками.
7. Изготовление ячеек быстрого аварийного выключения ВЧ поля в ускоряющих резонаторах обеспечило:

- исключение развития ВЧ пробоев в ускоряющих резонаторах и элементах волноводного тракта;

- автоматическое восстановление рабочего режима ВЧ системы в случае разовых и редких пробоев;

- запрет на подачу возбуждения на вход клистрона при наличии некоторых других аварийных сигналов в цепях УБС, которые связаны с готовностью волноводного тракта и резонатора к приему ВЧ мощности (готовность АРЧТ, вакуум, охлаждение ферритового вентиля, давление сжатого воздуха и т.д.).

8. Проведена модернизация системы АРФА, а именно:

- исследования и новые разработки для реализации электронного регулирования фазы в ускоряющих резонаторах в диапазоне 360 градусов;

- оптимизация электронных схем для повышения надежности работы предварительного усиления ВЧ мощности, а также модернизация системы стабилизации амплитуды ВЧ поля с транзисторным СВЧ усилителем в качестве исполнительного органа повысили в три раза статический коэффициент стабилизации до 30 и полоса кольца обратной связи расширилась до 2 МГц с упредителем, а значение перекрестных фазовых возмущения остались без изменения;

- оптимизация структуры цепи обратной связи системы

стабилизации амплитуды ВЧ поля в резонаторе.

9. Выполнена модернизация системы АРЧТ, которая позволила существенно сократить размеры схемы при сохранении тех же выходных параметров системы.

В результате проведенных работ, ВЧ каналы № 3-10,3-11,4-1 имеют следующие основные выходные параметры:

- длительность в/в импульса модуляторов – не менее 220 мкс.;
- неравномерность модулирующего импульса – не более  $\pm 1,5\%$ ;
- длительность импульса огибающей ВЧ поля в резонаторах – не менее 190 мкс.;
- стабильность ВЧ поля в ускоряющих резонаторах с включенными обратными связями по фазе и амплитуде системы АРФА – не более 1%;
- стабильность температуры ускоряющих резонаторов, обеспечиваемая системой АРЧТ – не более  $1^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, были достигнуты проектные уровни ВЧ полей в резонаторах при работе ВЧ каналов на частоте повторения импульсов

запуска 50 Гц при длительности ВЧ импульсов не менее 190 мкс. Системы АРЧТ и АРФА обеспечивают необходимую для ускорения пучка протонов

стабилизацию собственных частот резонаторов, а также амплитуд и фаз полей в резонаторах.

В рабочих сеансах ускорителя с использованием методов прецизионных измерений параметров пучка [1,2,3] подтверждено выполнение этой работы в полном объеме.

Заключение: Оборудование ВЧ каналов № 3-10, 3-11, 4-1 готово к эксплуатации в составе линейного ускорителя при работе в сеансах по ускорению пучка протонов в диапазоне энергий от 209 до 267 МэВ.

## **1.2 Изготовление опытной партии модернизированных генераторных ламп с целью обеспечения их применения в качестве модуляторных ламп**

В системе ВЧ питания начальной части линейного ускорителя ИЯИ РАН в течение 20 лет находилась в эксплуатации модуляторная лампа ГМИ-44А, разработанная в 70-х годах прошлого века в ОКБ «Светлана», Санкт-Петербург.

Основное производство этих ламп пришлось на 80-е годы, общее количество произведённых ламп достигло 80-90 штук, что и обеспечило работу ускорителя в течение 20 лет. К началу 2000-х годов запасы ламп были исчерпаны, попытки восстановления в ОАО СЕД-СПб (преемник ОКБ «Светлана») вышедших из строя ламп оказались безуспешными, а о восстановлении производства ламп ГМИ-44А с единственным штучным потребителем не могло быть и речи. Единственным решением оказалось использование в качестве модуляторной лампы высокочастотного генераторного триода ГИ-71А, изготавливаемого в ОАО СЕД-СПб для мощного выходного ВЧ каскада канала усиления вместо лампы ГИ-54А, выпуск которой прекращён в 90-е годы. Случай использования ВЧ генераторного триода в качестве регулирующей лампы в анодном модуляторе имел место и раньше, но тогда лампа использовалась только для регулирования анодного напряжения выходного ВЧ каскада в момент ускорения импульса пучка. Формирование импульса с требуемым уровнем ВЧ поля в резонаторе осуществлялось модулятором с «мягким» разрядником.

Особенности работы модулятора в составе штатного ВЧ канала усиления .

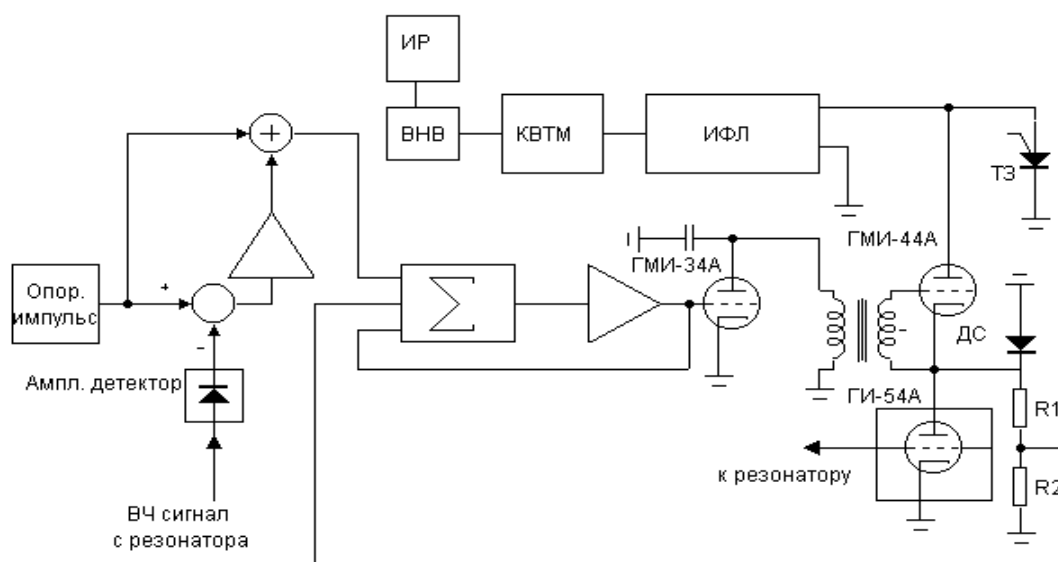


Рисунок 7 - Штатная схема модулятора с обратной связью, обеспечивающей стабилизацию ускоряющего поля в резонаторе ускорителя.



На схеме введены обозначения: ИФЛ – искусственная формирующая линия, КВТМ – высоковольтный выпрямитель, ВНВ – вакуумный выключатель, ИР – индукционный регулятор высокого напряжения, ТЗ – тиристорная защита.

Модуляторная лампа на приведенной схеме выполняет две функции:

1. Формирование импульса питания лампы выходного ВЧ каскада. Для самого «тяжёлого» резонатора №3 модулятор должен сформировать импульс длительностью 400 мкс с амплитудой до 30 кВ при токе в нагрузке 150-160 А.
2. Стабилизацию амплитуды ускоряющего ВЧ поля в резонаторе ускорителя. Дело в том, что мощные генераторные лампы, такие как ГИ-54А (именно под неё был разработан выходной ВЧ каскад) и ГИ-71А не позволяют регулировать выходную мощность изменением уровня ВЧ возбуждения при постоянном анодном напряжении. Да и практическая реализация такой схемы регулирования заметно усложняется при использовании триодных генераторов, работающих с отсечкой импульсов анодного тока. В этом случае приходится вводить дополнительный контур с обратной связью для стабилизации амплитуды импульса модулятора. Таким образом, единственным способом регулирования выходной мощности при ускорении пучка заряженных частиц (с целью стабилизации амплитуды ускоряющего поля) остаётся анодное импульсное напряжение лампы выходного ВЧ каскада.

Характерной особенностью конструкции ВЧ каскада в системе ВЧ питания ускорителя ИЯИ РАН – в отсутствии блокировочного конденсатора, разделяющего цепи анодного питания и колебательную систему – анодно-сеточный контур. На рисунке 8 представлены два основных варианта конструкции мощных ВЧ каскадов – с блокировочным конденсатором (слева) и без (справа). В конструкции без блокировочного конденсатора такое разделение достигается размещением узла ввода высокого напряжения (ВН) в узле электрического поля.

При этом внутренняя жила коаксиального анодно-сеточного контура оказывается под высоким напряжением (ВН). В свою очередь наличие ВН на внутреннем электроде коаксиального контура приводит к тому, что любой ВЧ пробой в контуре инициирует пробой по цепи анодного питания лампы выходного каскада, сопровождаемый броском тока в цепи анодного питания модуляторной лампы.

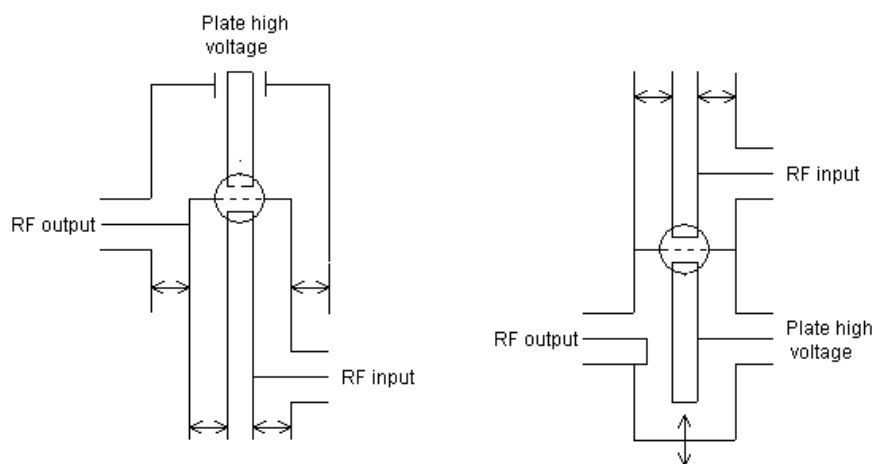


Рисунок 8 - Основные варианты конструкции выходного ВЧ каскада – с блокировочным конденсатором (слева) и без блокировочного конденсатора (справа).

Для мощных генераторных ламп характерны внутриламповые искрения (пробой), особенно в начале эксплуатации. По мере тренировки лампы количество искрений уменьшается. Кроме того, из-за перенапряжений могут возникать пробой в коаксиальной структуре анодно-сеточного контура выходного ВЧ каскада - в пучности электрического поля, амплитуда которого достигает нескольких сотен кВ.

При этом если число искрений уменьшается по мере тренировки лампы, то количество пробоев в контуре, наоборот, по мере «усталости» паяных и сварных швов со временем возрастает. Вот почему для борьбы с контурными пробоями всегда предлагается использовать повышенное давление в анодно-сеточном контуре, что существенно усложняет конструкцию и увеличивает время замены лампы.

В выходных каскадах системы ВЧ питания начальной части ускорителя ИЯИ РАН с самого начала отказались от повышенного давления, и чтобы обеспечить эффективную работу ускорителя пришлось пересмотреть принцип работы защиты выходного ВЧ каскада.

Согласно проекту в каждом модуляторе системы ВЧ питания была предусмотрена параллельная система защиты (crowbar system), которая должна при каждом пробое (искрении) в генераторной лампе (в выходном ВЧ каскаде) в течение нескольких мкс разряжать накопитель в аноде модуляторной лампы. Разрядное устройство представляло собой последовательное соединение 150 тиристоров, которые подключались параллельно искусственной формирующей линии (ИФЛ) и которые синхронно запускались при броске анодного тока модуляторной лампы. За 10 лет эксплуатации тиристорной защиты был обнаружен целый ряд недостатков этой системы:

- последовательное соединение тиристоров требует специального подбора тиристоров с идентичными параметрами. В противном случае они постоянно будут выходить из строя.
- При срабатывании тиристорной защиты ток в земляной шине превышает 1000А, что создаёт мощные наводки на низковольтную измерительную аппаратуру и приводит к ложному запуску тиристорной защиты в соседних модуляторах. Поэтому при работе ускорителя возникают групповые отключения каналов усиления, что значительно снижает эффективность работы ускорителя из-за длительных простоев, связанных с процессами восстановления работоспособности каналов и настройкой резонаторов.
- Наличие тиристорной защиты затрудняет процесс тренировки генераторной лампы, поскольку из-за высокого быстродействия защиты внутри лампы не успевают происходить процессы уничтожения неоднородностей, вызывающих пробой. Вот почему при установке «свежей» лампы в выходной ВЧ каскад приходилось на несколько часов отключать тиристорную защиту.

Всё это привело к тому, что вместо тиристорной защиты была разработана последовательная система защиты с аббревиатурой ПРИЗ (прерывание и задержка). Принцип работы этой системы заключается в том, что при возникновении пробоев в выходном ВЧ каскаде, сопровождаемым броском тока, в течение нескольких микросекунд происходит запираение модуляторной лампы (см. рисунок 9).

При этом после первого срабатывания защиты в течение нескольких мкс происходит запираение модуляторной лампы на 1-2 сек с тем, чтобы дать время на восстановление электропрочности пробитого зазора. За время 1-2 сек резонатор не успевает расстроиться и повторное включение канала не вызывает проблем. Если же при повторном включении ситуация повторяется, происходит полное отключение канала.

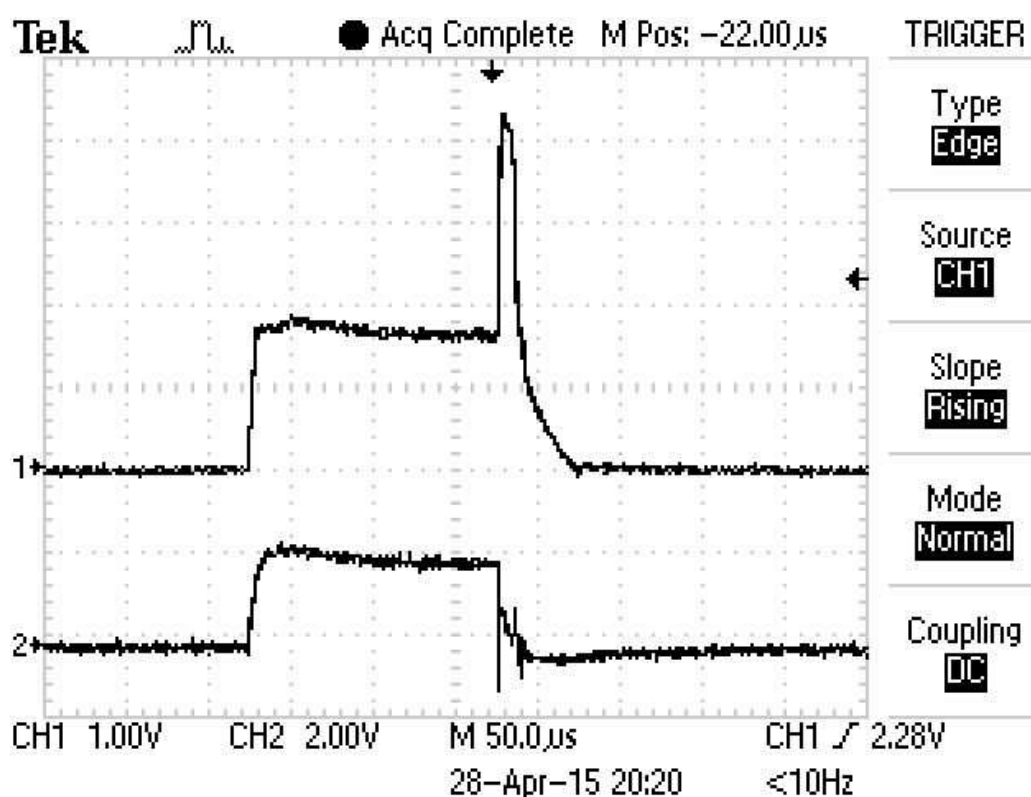


Рисунок 9 - Осциллограммы импульсов анодного тока (верхний луч) и импульсного выходного напряжения модулятора (нижний луч).

Новая схема защиты существенно повысила эффективность работы системы ВЧ питания и ускорителя в целом. В отдельных пучковых сеансах в течение двух недель непрерывной работы имели место сотни срабатываний защиты на разных каналах практически без отключения ускорителя.

Таким образом, с введением в эксплуатацию системы ПРИЗ функции модуляторной лампы расширились, поскольку, кроме формирования импульса и стабилизации амплитуды ускоряющего поля лампа модулятора выполняет ещё и функции защиты генераторной лампы.

Тем не менее, были отмечены случаи, когда система ПРИЗ не запирала лампу ГМИ-44А. Как правило, это было связано с нарушением вакуума в лампе из-за отключения блока питания вакиона (магниторазрядного насоса).

#### Особенности работы модулятора на лампе ГИ-71А.

Как было отмечено, выпуск ламп ГМИ-44А и ГИ-54А (рисунок 1) был прекращён ещё в 80-е годы прошлого столетия. Производство альтернативы ГИ-54А – лампы ГИ-71А, было своевременно организовано на СЕД-СПб в 2001-2007 годах и к 2012 году все выходные ВЧ каскады были переведены на лампу ГИ-71А.

Попытка реставрации ламп ГМИ-44А окончилась неудачей – из семи отреставрированных ламп только одна проработала около 1000 часов, остальные вышли из строя раньше. Таким образом, только одна лампа – ГИ-71А могла быть использована в качестве модуляторной с минимальными переделками схемы модулятора.

На рисунке 10 приведена упрощённая схема мощного анодного модулятора выходного ВЧ каскада с лампой ГИ-71А. На схеме введена следующая аббревиатура: AFL – искусственная формирующая линия, TRPM – транзисторный подмодулятор, TR- тиристорный регулятор напряжения накала, DTL - резонатор начальной части ускорителя.

Использование искусственных формирующих линий позволяет существенно улучшить ситуацию. Для последующего изложения модуляторная лампа обозначена как лампа ГИ-71АМ, хотя на самом деле, как в модуляторе, так и в выходном ВЧ каскаде установлена лампа ГИ-71А.

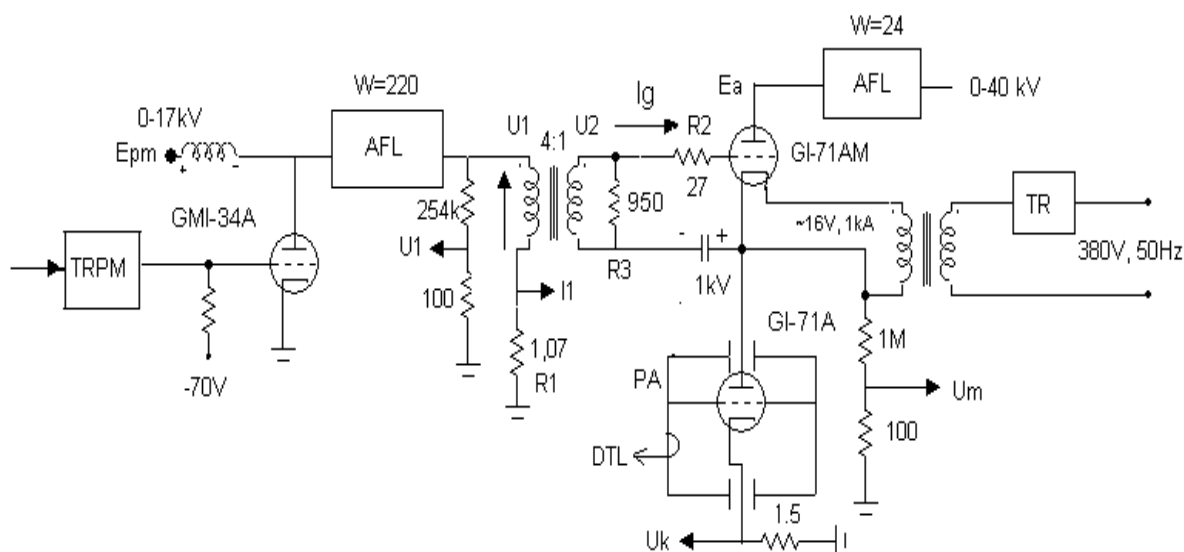


Рисунок 10 - Упрощённая принципиальная схема анодного модулятора с лампой ГИ-71А .

На схеме показаны делители, с помощью которых измеряются основные режимы модулятора, накопителя в аноде ламп подмодулятора ГМИ-34А и модулятора ГИ-71АМ, приведены величины питающих напряжений в основных точках схемы.

Между модулятором и подмодулятором установлен импульсный трансформатор ИТ, а также источник отрицательного смещения, зашунтированный ёмкостью. Сопротивление R2 ограничивает величину сетевого тока при аварийных ситуациях (КЗ сетка-катод) и сбивает паразитную генерацию в колебательной системе, образованной индуктивностью вторичной обмотки ИТ и межэлектродными емкостями модуляторной лампы. Как следует из приведенной схемы модулятора нагрузка - выходной ВЧ каскад, включён в катод модуляторной лампы.

Следует отметить, что между лампами ГМИ-44А и ГИ-71А имеются существенные различия как конструктивные, так и технические.

Лампа ГМИ-44А – с магнитной ловушкой, что позволяет существенно улучшить токораспределение, т.е. снизить величину сеточного тока . В лампе ГМИ-44А величина сеточного тока  $I_{go} = (0.01-0,02)I_{ao}$ , где  $I_{ao}$  – анодный ток модуляторной лампы (постоянная составляющая тока генераторной лампы), то в модуляторной лампе ГИ-71А это соотношение возрастает в 10 раз. Кроме того, лампа ГИ-71А в качестве модуляторной (ниже она будет иметь шифр ГИ-71АМ) имеет меньшее усиление, что, с учётом больших сеточных токов, приводит к необходимости повышения мощности как транзисторного подмодулятора, так и лампового с модуляторной лампой ГМИ-34А (рисунок 10).

На рисунках 11 и 12 приведены фотографии ламп ГМИ–44А и ГИ-71АМ, подготовленные к установке в модулятор, на рисунке 6 – лампа ГИ-71АМ, установленная в модуляторе.



Рисунок 11 - Лампа ГИ-71АМ, подготовленная к установке в модулятор.





Рисунок 12 - Лампа ГМИ-44А, подготовленная к установке в модулятор



Рисунок 13 - Лампа ГИ-71АМ, установленная в модулятор.

Особенности расчёта режима лампы ГИ-71АМ и подмодулятора а также некоторые результаты первых испытаний лампы ГИ-71АМ подробно изложены в отчете сектора ВЧ питания ускорителя. Лампы ГИ-71АМ были установлены в модуляторы на всех шести каналах усиления. Причём, модуляторы маломощных каналов усиления с уровнем выходной ВЧ мощности около 1 МВт, работающие на резонаторы № 1, 5, показали после перехода на лампу ГИ-71АМ устойчивую работу практически без отключений. Однако по мере перехода на более мощные каналы, когда анодное напряжение на ГИ-71АМ приблизилось к 35 кВ, ситуация резко изменилась – несмотря на работу системы ПРИЗ запираение модуляторной лампы не происходит. На рисунке 14 приведена осциллограмма токов выходного ВЧ каскада, из которых видно, что несмотря на работу системы защиты, обрывающего импульс модулятора и,

соответственно, ток катода, лампа ГИ-71АМ остаётся открытой вплоть до полного разряда искусственной формирующей линии.

На рисунке 14 на нижнем луче приведена осциллограмма напряжения на первичной обмотке импульсного трансформатора, наведённого из вторичной обмотки. Из анализа многочисленных осциллограмм следует следующий сценарий развития событий.

- Происходит пробой в нагрузке – ВЧ каскаде К4, как правило, с анода на «землю», т.е. катод лампы ГИ-71АМ заземляется и лампа оказывается под полным напряжением ИФЛ.
- Сеточный ток резко уменьшается по двум причинам – из-за работы системы ПРИЗ и из-за увеличения анодного напряжения. Энергия магнитного поля, накопленная в индуктивности первичной обмотки импульсного трансформатора, при прерывании сеточного тока приводит к скачку напряжения на сетке ГИ-71АМ с последующим пробоем зазора сетка-катод лампы.
- Дальнейший процесс сводится к тому, что модуляторная лампа ГИ-71АМ оказывается открытой вплоть до полного разряда ИФЛ. Причём происходит разряд конденсатора смещения, из-за чего ламп ГИ-71АМ поддерживается в открытом состоянии. Разряд конденсатора может происходить только в одном случае – при пробое промежутка сетка-катод лампы ГИ-71АМ, т.к. ток разряда протекает в направлении, противоположном направлению сеточного тока. Наблюдаемая осциллограмма  $U_{ан}$  после пробоя в К4 является результатом протекания тока разряда конденсатора через первичную обмотку ИТ.
- Аналогичные процессы наблюдались и с лампами ГМИ-44А (особенно с отреставрированными) при случайном отключении системы высоковольтного питания магниторазрядного насоса. Из этого анализа следует вывод, что режимы сетки при работе в ВЧ каскаде и модуляторе существенно различаются, причём в модуляторе он более напряженный.

Действительно, в выходном ВЧ каскаде сеточные токи не превышают 5% от анодного, т.е. не превышают 10А (имеются в виду постоянные составляющие), в то время как в модуляторе они в два-три раза больше.

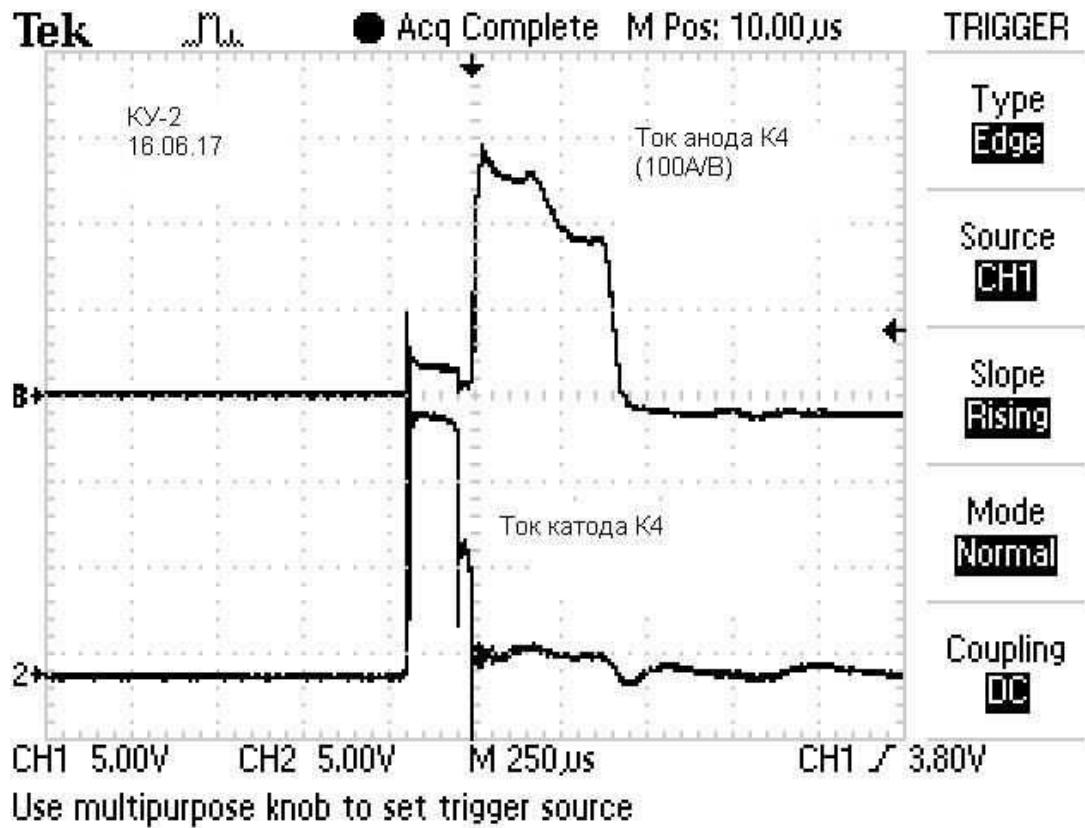


Рисунок 14 - Осциллограммы анодного (верхний луч) и катодного токов при пробоях в выходном ВЧ каскаде K4.

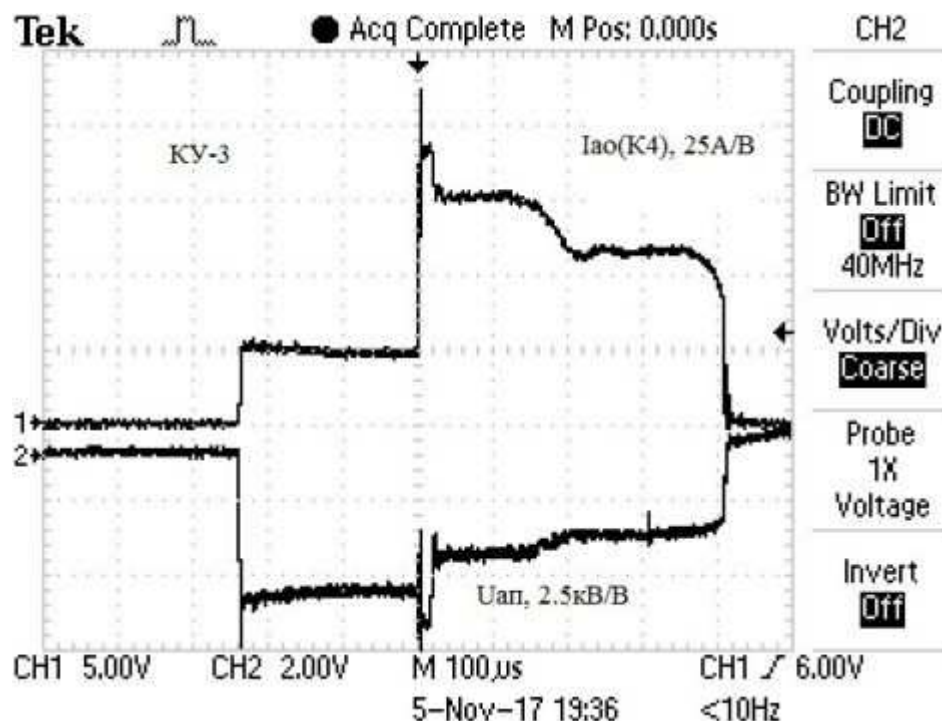


Рисунок 15 - Осциллограммы тока  $I_{aoK4}$  (верхний луч) и напряжения  $U_{ap}$  в первичной обмотке импульсного трансформатора.

- Анализ результатов многолетней эксплуатации ламп ГИ-71А и ГМИ-44А, начиная с 2008 года, показывает, что тандем этих ламп позволял (с помощью системы ПРИЗ) успешно тренировать лампу ГИ-71А в выходном ВЧ каскаде, работающим в штатном режиме. Это стало возможным благодаря трём обстоятельствам.
  - a) Лампы ГМИ-44А были изготовлены в 70-х – 80-х годах прошлого века со строгим соблюдением технологических процессов в условиях серийного производства – в среднем изготавливались 8-10 ламп в год.
  - b) В лампах ГМИ-44А предусмотрена установка магнито-разрядных насосов.
  - c) Сеточные токи в лампах ГМИ-44А не превышают 1-2 А .
- В свою очередь при переходе на лампу ГИ-71АМ имеют место существенные различия, определяющие характер поведения тандема ламп ГИ-71А и ГИ-71АМ:
  - d) Лампы ГИ-71А изготавливаются поштучно – 1-2 лампы в год. При таком количестве ламп трудно поддерживать требуемое качество технологических процессов.

- е) Действительно, неоднократно имели место случаи выхода из строя ламп после нескольких сотен часов эксплуатации в составе выходных ВЧ каскадов при максимальной наработке 8-9 тыс. часов.
- ф) В лампе ГИ-71АМ не предусмотрена установка магнито-разрядных насосов.
- г) Сеточные токи в лампе ГИ-71АМ составляют 30-40А, что существенно превышает уровень сеточных токов лампы ГМИ-44А.

В связи со сложившейся ситуацией было принято решение разработать модификацию лампы ГИ-71А специально для модулятора с установкой магниторазрядных насосов на сеточном электроде. На рисунке 9 приведена фотография лампы ГИ-71А с двумя встроенными магниторазрядными насосами.



Рисунок 16 - Общий вид лампы ГИ-71А с встроенными вакуумами.

В настоящее время лампа проходит испытания в одном из модуляторов.

### **1.3 Автоматизированная система перемещения 2-координатного детектора нейтронов установки Горизонт.**

Автоматизированная система перемещения детектора установки «Горизонт» предназначена для позиционирования детектора нейтронов в вертикальной плоскости рассеяния для регистрации отраженных образцом нейтронов в рефлектометрических экспериментах. В настоящее время перемещение детектора — единственная операция, во время измерений выполняемая вручную. Оснащение нейтронного рефлектометра-малоуглового спектрометра «Горизонт» данной системой позволит полностью автоматизировать процесс.

На импульсном источнике нейтронов ИН-06 сконструирован времяпролетный рефлектометр - малоугловой спектрометр «Горизонт». В рефлектометре «Горизонт» отражение нейтронов происходит в вертикальной плоскости, что позволяет исследовать жидкие образцы. Установка «Горизонт» предназначена для работы на нейтронах с верхнего замедлителя, обладающего более мягким спектром. В стандартном режиме работы ускорителя длительность протонного импульса составляет 50 мкс, а длительность импульса тепловых нейтронов около 60 мкс. При необходимости длительность протонного импульса может задаваться в диапазоне 0.25–200 мкс. Максимум тепловой части спектра нейтронов, попадающих в канал, приходится на 1.3 Å. Протонный ускоритель может работать с частотой повторения импульсов 25 или 50 Гц. При частоте 25 Гц можно проводить измерения на холодных нейтронах, вплоть до 9 Å. Установка «Горизонт» (рисунок 17) состоит из зеркального изогнутого нейтронновода, установленного в канале биологической защиты источника ИН-06, и оптической скамьи, на которой размещены три подвижные платформы, укомплектованные двумя автоматизированными коллимирующими щелевыми устройствами и отклоняющим суперзеркалом.

За оптической скамьей установлен виброустойчивый стол образца с гониометром. Нейтроновод имеет зеркальный канал, изогнутый в вертикальной плоскости, длиной 7000 мм с сечением 70 мм (ширина)  $\times$  10 мм (высота) и радиусом кривизны 520 м. Канал нейтроновода состоит из 14 плоских секций, расположенных под углом относительно друг друга. Верхние и боковые стенки канала представляют собой многослойные NiMo/Ti зеркала с  $m = 2$  (т.е. критический угол полного отражения нейтронов с длиной волны 1 Å в два раза больше, чем у природного никеля), а нижние стенки – Ni зеркала. Данная конструкция обеспечивает увеличение плотности потока тепловых и холодных нейтронов на образце и не пропускает нейтроны с длиной волны менее 1 Å. Таким образом, улучшаются фоновые условия в экспериментальной зоне.

Коллимирующие щелевые устройства позволяют формировать падающий на образец пучок нейтронов по высоте в пределах 0 – 12 мм и по ширине в пределах 0–70 мм с точностью позиционирования не хуже 0.005 мм. Отклоняющее суперзеркало – многослойное NiMo/TiZr с  $m = 2$  – позволяет задавать угол падения нейтронного пучка на образец с точностью  $\pm 5$  угл. сек. При выходе из нейтроновода пучок нейтронов наклонен вниз и образует с горизонтальной плоскостью угол  $0.77^\circ$ . Отклоняющее суперзеркало позволяет увеличить угол падения пучка на образец. Использование отклоняющего суперзеркала необходимо для исследований жидких образцов, когда плоскость образца должна оставаться горизонтальной. Узел образца позволяет перемещать образец в трех взаимно перпендикулярных направлениях и наклонять его относительно пучка в пределах  $\pm 5^\circ$  с точностью  $\pm 5$  угл. сек. Детектор нейтронов может перемещаться в вертикальной плоскости, изменяя угол обзора детектора в пределах от  $5^\circ$  сверху и  $1^\circ$  снизу относительно оси первичного пучка. Установка была оснащена двухкоординатным позиционно чувствительными детекторам (ПЧД) производства ЛНФ ОИЯИ. Чувствительная площадь детектора — 200x200 мм, координатное разрешение 2 мм.



В рефлектометрической моде ПЧД позволит наблюдать незеркальные отражения нейтронов, из которых можно получить информацию о шероховатостях поверхностей и границ раздела сред, например в многослойных нанопленках. Двухкоординатный ПЧД позволит наблюдать малоугловое рассеяние при скользких углах (GISANS) в рефлектометрической моде и анизотропию рассеяния в малоугловой моде. В рефлектометрической моде (рис. 17а) пучок нейтронов падает на плоскость образца, который может быть наклонен в плоскости рассеяния, обеспечивая тем самым необходимый угол падения нейтронов. При исследовании жидкостей, когда образец невозможно наклонять в плоскости рассеяния, необходимый угол падения нейтронов задается с помощью отклоняющего суперзеркала (рисунок 17б).

В малоугловой моде (рисунок 17в) пучок нейтронов проходит сквозь образец и задерживается в ловушке прямого пучка, расположенной перед детектором. Рассеянные нейтроны регистрируются двухкоординатным детектором, который располагается симметрично относительно падающего на образец пучка. Разрешение установки определяется следующими факторами: неопределенностью времени пролета нейтрона, расходимостью падающего на образец пучка, конечными размерами образца и координатным разрешением детектора. Также разрешение по переданному импульсу обратно пропорционально углу рассеяния. Неопределенность времени пролета нейтрона складывается из длительности импульса тепловых нейтронов и погрешности определения времени попадания нейтрона в детектор. При длительности импульса тепловых нейтронов 100 мкс неопределенность времени пролета составляет 1%. При данной длительности, размере пучка нейтронов, падающего на образец,  $4 \times 4$  мм, угле рассеяния  $0.5^\circ$  и разрешении детектора 2 мм относительная погрешность определения переданного импульса составляет  $\Delta Q/Q = 13\%$ , а при угле рассеяния  $5^\circ$  –  $\Delta Q/Q = 1.6\%$ .

Хотя установка работает по методу измерения времени пролета и не требуется сканирования по углу рассеяния, для получения информации о структуре образца в широком диапазоне необходимо охватить диапазон углов около  $5^\circ$ , что соответствует перемещению детектора размером 200 мм на расстоянии 4 м от образца в диапазоне 1 м в вертикальной плоскости. В настоящее время перемещение осуществляется вручную. Для более эффективного использования пучкового времени необходима автоматизированная система перемещения детектора. Помимо координатного разрешения самого детектора, на разрешение установки влияет точность его позиционирования. Поскольку ход нейтронного пучка может изменяться с помощью отклоняющего суперзеркала, а позиционирование детектора необходимо относительно первичного (либо отраженного образцом в рефлектометрическом эксперименте) пучка, в разработанной системе используется лазерный луч для определения положения детектора. Лазерный луч имитирует ход первичного или отраженного образцом пучка нейтронов. На детекторе же расположены датчики (фотоэлементы), позволяющие фиксировать положение пучка и с его помощью корректно рассчитывать угол рассеяния.

Система должна обеспечивать перемещение детектора (ПЧД) установки «Горизонт» в вертикальной плоскости в пределах  $1^\circ$  вниз и  $5^\circ$  вверх от оси пучка (1650 мм от уровня пола) с точностью позиционирования  $\pm 1$  мм со скоростью не менее 2 мм/сек. Горизонтальный люфт детектора – не более 1 мм. Размеры детектора — 400x400, масса 25 кг. Детектор закреплен на каретке, которая может перемещаться по направляющим по вертикали, в плоскости рассеяния, с помощью ходового винта (одного или двух). Ходовые винты и направляющие крепятся на вертикальной раме высотой 2800-3000 мм, которая крепится к полу, а также может крепиться к потолку бункера (высота потолка 3м). Должна быть предусмотрена возможность ручного вращения ходовых винтов с помощью маховиков или рукояток. Направляющие и ходовые винты должны быть расположены на расстоянии не менее 150 мм от оси пучка.

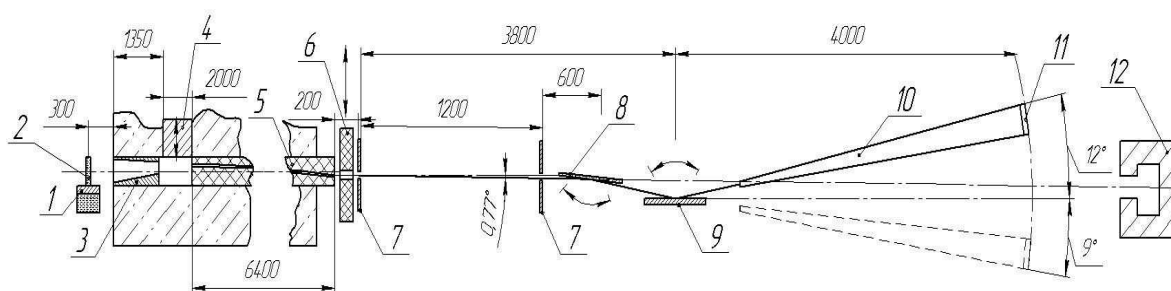
Управление шаговых двигателей должно осуществляться с помощью контроллера с интерфейсом RS232/RS485, а также иметь программу управления. Шаговые двигатели (ШД) должны иметь концевые выключатели. Также в комплекте должен быть блок питания ШД и контроллера. Длина сетевого и сигнальных кабелей — не менее 5 м.

Стальные детали (кроме нержавеющей стали) должны иметь покрытия (цинк, никель и т.п. или эмаль).

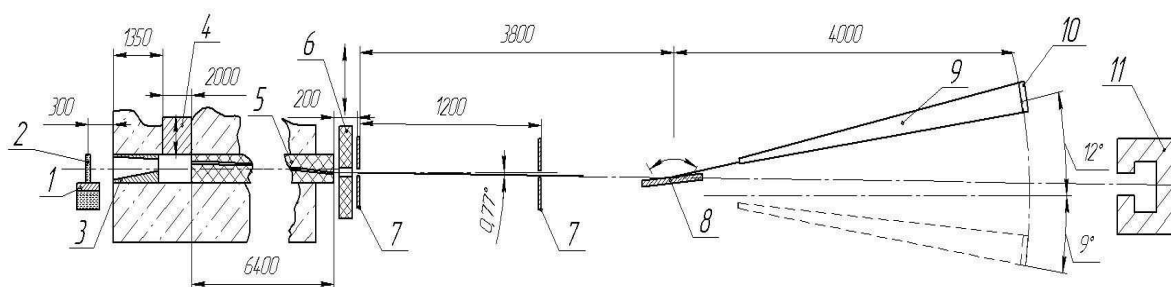
Система должна иметь лазерный датчик положения детектора с контрольными точками, соответствующими пересечению плоскостью детектора прямого и отраженного пучка нейтронов (т.е. ход лазерного луча соответствует ход пучка нейтронов).

Оснащение установки «Горизонт» автоматизированной системой перемещения детектора позволит упростить и ускорить процесс позиционирования детектора и осуществлять управление установкой полностью дистанционно, что позволит сократить время нахождения персонала в зоне с повышенным радиационным фоном и более эффективно использовать пучковое время.

а)



б)



в)

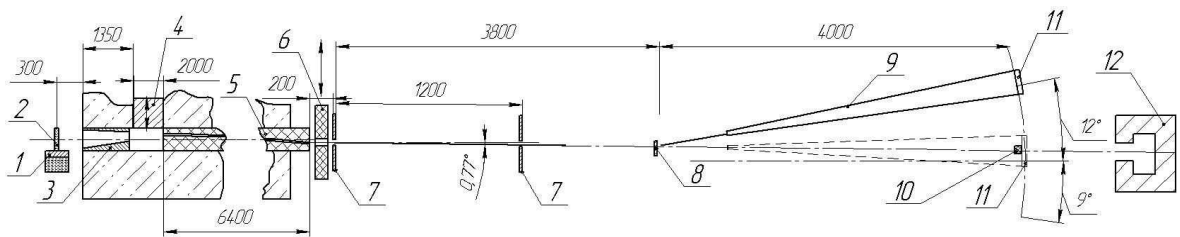


Рисунок 17 - Оптическая схема установки «Горизонт».

- а) — режим нейтронного рефлектометра с отклоняющим суперзеркалом,
- б) — режим нейтронного рефлектометра без отклоняющего суперзеркала,
- в) — режим малоуглового спектрометра.

#### 1.4 Система автоматизации и мониторинга установки «Геркулес»

Выполнена разработка технического задания по автоматизации и мониторинга установки «Геркулес». Цель модернизация установки Геркулес - контролировать и регулировать давление на образце. Новые датчики давления будут более точно отслеживать давления на образце, Web-камеры отслеживать состояние образца в процессе эксперимента. Новые блоки накопления спектров улучшат качество получаемых данных и расширить количество используемых детекторов, новое программное обеспечение - работать с несколькими TDC по сети LAN и производить накопление, и анализ полученных данных. Новые TDC и новое программное обеспечение позволит отказаться от устаревшей системы крейтов типа КАМАК.

Наиболее важные параметры состава системы автоматизации и мониторинга установки «Геркулес» следующие:

TDC (Time to digital converter) – 2 шт.

Количество независимых входов – не менее 8

Ширина окна времени регистрации от 0.125 до 100 миллисекунд

Количество каналов на окно регистрации – не менее 4000

Программное обеспечение со следующими функциями: управление насосом и слежение за давлением на образце, вывод изображения с web-камер для контроля за образцом и камерой давления в кейсе, прием данных с нескольких TDC и отображение экспериментальных данных.

## **1.5 Устройства высокого давления для нейтронных, синхротронных, мёссбауэровских и рентгеновских исследований, изготовление оборудования.**

### Исследование веществ в экстремальных условиях - основные направления исследований

Основным направлением является исследование физических и химических свойств веществ, а также синтез новых фаз при высоких давлениях, при высоких и криогенных температурах, и в сильных магнитных полях. Интенсивно проводятся исследования фазовых структурных, электронных и магнитных переходов, спиновых кроссоверов и переходов типа диэлектрик-металл и диэлектрик-полупроводник при высоких статических давлениях. Одним из важнейших направлений является синтез в экстремальных условиях новых материалов с уникальными физико-химическими свойствами. В частности синтез материалов с высокой плотностью запасённой энергии на основе полимерного азота. Отдельно следует отметить проблему металлического водорода, которая тоже является предметом активного исследования. Изучение природы электронных и фазовых переходов при высоком давлении вообще имеет фундаментальную ценность как метод плавного изменения межионных расстояний и углов химсвязей в кристалле, что даёт возможность тонкой подстройки структуры к оптимальным или рекордным значениям параметров. Таких, например, параметров, как величина  $T_C$  в ВТСП, величина отклика в кристалле с гигантским магнетосопротивлением или восприимчивость в спинтронном материале или мультиферроике. Поэтому поиск новых материалов с рекордными свойствами в области близкой к фазовому или электронному переходу с помощью техники высоких давлений представляется актуальной задачей. Применение же техники высоких давлений для изучения геофизики и особенностей внутреннего строения и динамики Земли и других планет, представляется просто очевидным и единственно возможным экспериментальным методом.

## Экспериментальные методики

Основой эксперимента являются камеры с алмазными наковальнями для исследований при высоких и сверхвысоких давлениях. Камеры приспособлены для различных типов и методик физических исследований. При исследовании образцов используется комплексный подход с применением целого набора экспериментальных методик для исследования свойств материалов при высоких давлениях. В эти методики входят:

1. Проектирование, разработка и изготовление камер с алмазными наковальнями для исследований при высоких и сверхвысоких давлениях.
2. Рамановская спектроскопия при высоких давлениях.
3. Измерение спектров люминесценции, оптического поглощения и отражения при высоких давлениях.
4. Мёссбауэровская спектроскопия при высоких давлениях.
5. Синхротронная мёссбауэровская спектроскопия при высоких давлениях (NFS – Nuclear Forward Scattering).
6. Рентгеновская дифракция при высоких давлениях (порошковая и монокристаллическая).
7. Синхротронная рентгеновская эмиссионная спектроскопия высокого разрешения (XES – x-ray emission spectroscopy)
8. Синхротронная резонансная рентгеновская спектроскопия неупругого рассеяния (RIXS – resonant inelastic x-ray spectroscopy)
9. Измерение электросопротивления при высоких давлениях, высоких и низких температурах.

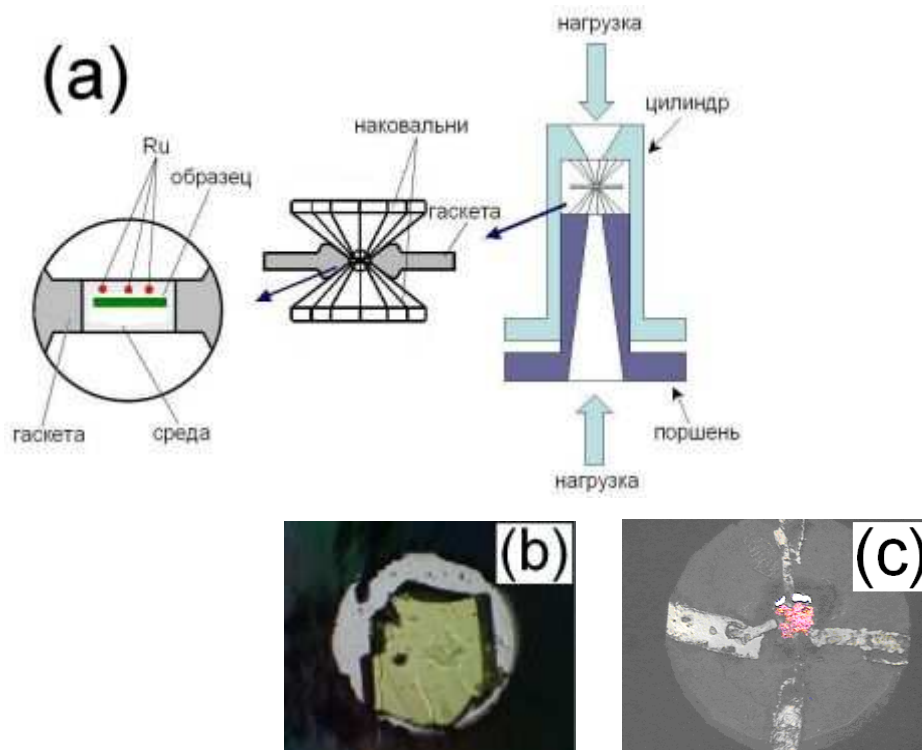


Рисунок 18 - Схематический вид камеры высокого давления с алмазными наковальнями (а). Пример расположения кристалла  $\text{FeVO}_3$  в рабочем объеме камеры (b) и сборка эксперимента для измерения электросопротивления в  $\text{BiFeO}_3$  четырехконтактным методом (с).

Важным моментом при проведении экспериментов является повсеместное использование гидростатических сред ( $\text{He}$ ,  $\text{Ne}$ ) для получения наиболее чистых результатов, неискажённых эффектами негидростатичности.

Часть экспериментов проводится в тесной кооперации с зарубежными коллегами с использованием уникальных установок на основе синхротронов 3-го поколения в APS (США, Аргонн) и ESRF (Гренобль, Франция).

#### Имеющийся задел, опыт

Разработаны камеры высокого давления с алмазными наковальнями для различных типов экспериментов и методик. Следует отметить уникальную, симметричную немагнитную камеру для криогенных исследований, в сильных магнитных полях отличающуюся высокой стабильностью давления при охлаждении. Эти камеры были разработаны в криомагнитных установках на

синхротронных станциях различного назначения. Камера позволяет проводить практически все виды исследований.

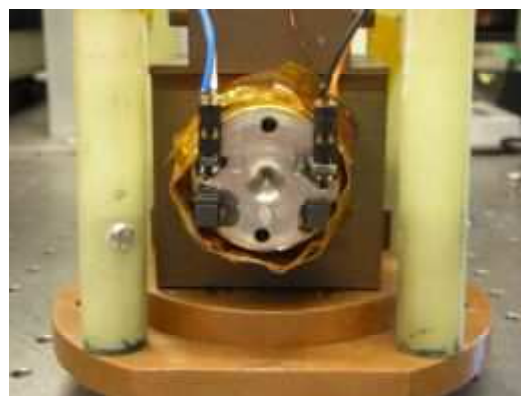


Рисунок 19 - Немагнитная симметричная камера с алмазными наковальнями в эксперименте по измерению транспортных свойств в гелиевом криостате

Также разработана уникальная, миниатюрная немагнитная камера для криогенных исследований, в сильных магнитных полях отличающаяся высокой стабильностью давления при охлаждении. Эти камеры разработаны для использования в PPMS установках и в криомагнитных установках на синхротронных станциях различного назначения, где существует сильное ограничение на размер образца. Камера позволяет проводить практически все виды исследований.

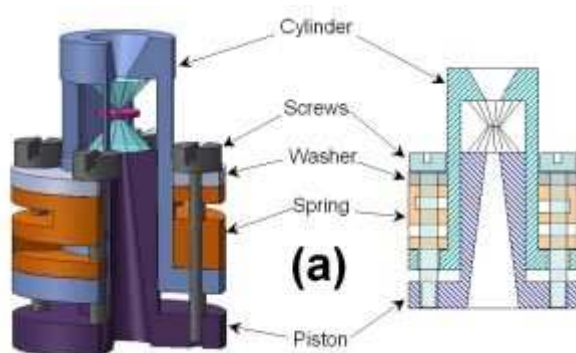


Рисунок 20 - Миниатюрная немагнитная камера с алмазными наковальнями

Также разработан вариант такой камеры для мессбауэровской установки с гелиевым криорефрижиратором.



Создан и развивается комплекс технологических и экспериментальных установок необходимых для подготовки и проведения экспериментов при высоких и сверхвысоких давлениях: мёссбауэровская установка с криорефрижиратором и специально сконструированными камерами высокого давления с алмазными наковальнями, рентгеновская лабораторная установка для исследования рентгеновской дифракции при высоких давлениях, высокочувствительная рамановская установка высокого пространственного разрешения; высокочувствительная оптическая установка для измерения спектров люминесценции, оптического поглощения и отражения; оптические стерео микроскопические установки для манипулирования микро образцами и сборки экспериментов. Данный комплекс позволяет полностью подготовить эксперимент для измерений при высоких и сверхвысоких давлениях, в том числе и на уникальных установках на базе синхротронов 3-го поколения.

### Стабильность давления при низких температурах

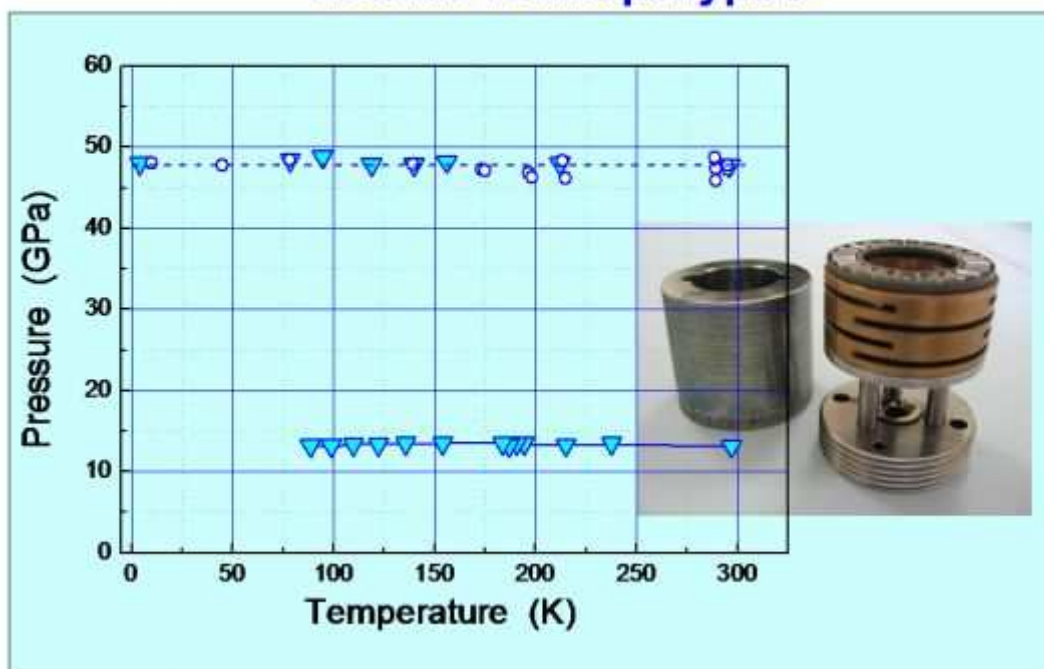


Рисунок 21 – Стабильность давления при низких температурах

## Лабораторная установка для рентгеновской дифракции под давлением



Рисунок 22 – Рентгеновская дифракция под давлением

### Решаемые задачи, основные результаты за отчётный период

Изучение природы фазовых переходов в сильно коррелированных оксидах переходных металлов, их типы, взаимовлияние, последовательность и взаимосвязь (т.е. изучение различных сценариев фазовых превращений) может прояснить ряд фундаментальных проблем физики твёрдого тела. В том числе ответить на вопросы связанные с природой таких важных систем как высокотемпературные сверхпроводники, кристаллов с гигантским магнетосопротивлением, спинтронных материалов, мультиферроиков, а также кристаллов, важных для понимания физики Земли. Проведены пионерские исследования на синхротронах третьего поколения магнитных фазовых переходов, индуцированных высоким давлением в сильно коррелированных оксидах переходных металлов. Было показано, что данные переходы обусловлены спиновым кроссовером в электронной системе иона переходного металла. Обнаружено, что спиновый кроссовер может сопровождаться

переходами диэлектрик-полупроводник и диэлектрик-металл, а также структурными аномалиями или структурными переходами первого рода.

Магнитные свойства гематита  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  исследованы при высоком гидростатическом давлении методом синхротронной мёссбауэровской спектроскопии NFS (Nuclear Forward Scattering) на ядрах железа. Временные NFS спектры гематита измерялись в камере высокого давления с алмазными наковальнями в диапазоне давлений 0-72 ГПа и температур 36 К до 300 К, с целью изучения магнитных свойств при фазовом переходе области критического давления  $\sim 50$  ГПа. Кроме того, при комнатной температуре изучены спектры комбинационного рассеяния света в диапазоне давлений 0-77 ГПа. В качестве среды, передающей давление, использовался Ne. При давлении  $\sim 48$  ГПа обнаружено возникновение промежуточного электронного состояния, вероятно, связанного со спиновым кроссовером в ионах железа  $\text{Fe}^{3+}$  при их переходе из высокоспинового состояния (HS,  $S = 5/2$ ) в низкоспиновое (LS,  $S = 1/2$ ). Установлено, что диапазон переходной области HS-LS кроссовера находится между 48 и 55 ГПа и почти не зависит от температуры. Этот удивительный результат совершенно отличается от других случаев спинового кроссовера в ионах  $\text{Fe}^{3+}$ , наблюдавшихся в других кристаллах на основе оксидов железа. Как правило, переходная область спинового кроссовера возникает из-за эффекта термических флуктуаций между HS и LS состояниями в критической области давлений и значительно сужается при охлаждении вследствие подавления термических возбуждений. По результатам измерений построена магнитная P-T фазовая диаграмма  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  при высоких давлениях и низких температурах в области спинового кроссовера.

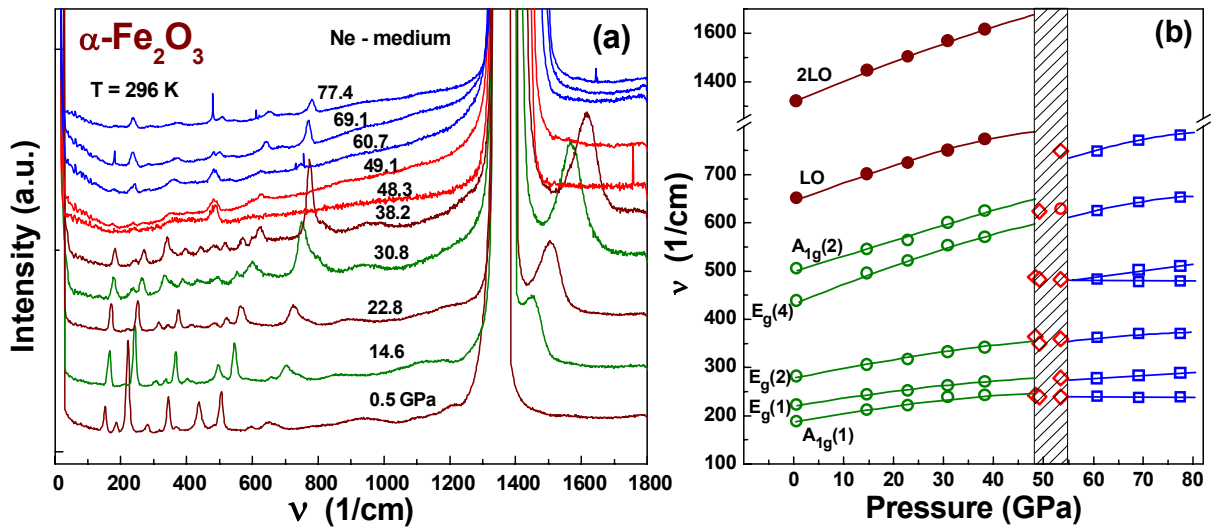


Рисунок 23 - Эволюция рамановских спектров (а) кристалла гематита  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  с ростом давления в гидростатических условиях, и (b) зависимость от давления рамановских частот. Среда, передающая давление – неон. При давлении  $\sim 48$  ГПа вид спектра кардинально изменяется, указывая на начало фазового перехода в гематите. Окончательно новый вид спектра устанавливается после 55 ГПа.

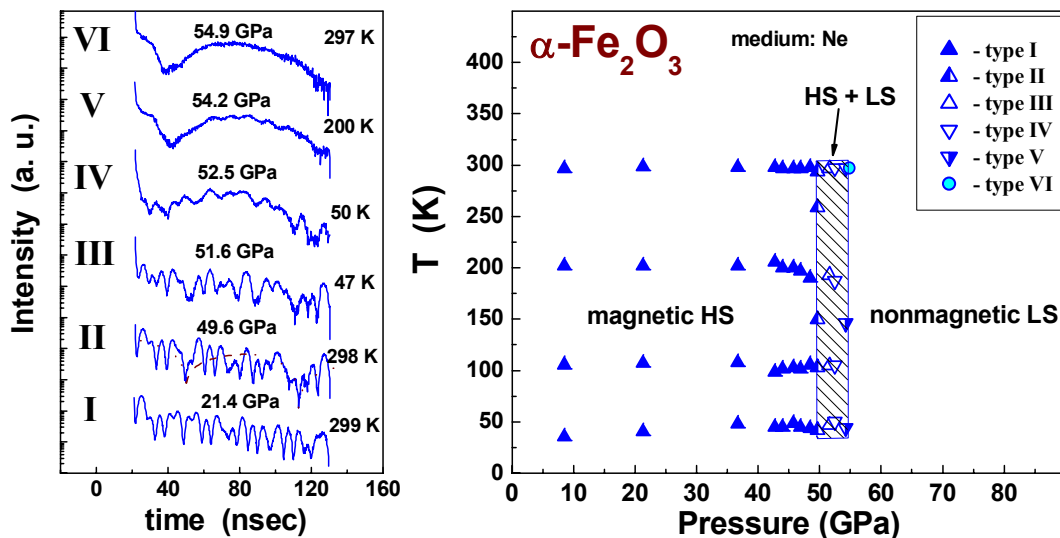


Рисунок 24 - (а) Характерные NFS спектры, наблюдаемые в эксперименте. Тип спектра I соответствует чистой магнитной фазе с магнитным полем на ядре  $H_{hf} \sim 50$  Тесла. Тип II – хорошо аппроксимируется моделью I с добавлением небольшого вклада от немагнитной фазы. Типы III и IV – соответствуют середине переходной области, где оба вклада, магнитный и немагнитный имеют сравнимую величину, с преобладанием одного из них. Например, видно, как в спектре IV превалируют низкочастотные биения немагнитной фазы, модулированные высокочастотными осцилляциями от магнитной фазы. Тип V – соответствует краю переходной области, когда вклад от магнитной фазы, хотя ещё и заметен, но намного меньше вклада от немагнитной фазы.

И, наконец, тип **VI** – соответствует области давлений, где присутствует только немагнитная фаза с квадрупольным расщеплением  $\Delta \sim 1$  мм/сек.

**(b)** Фазовая диаграмма антиферромагнитного изолятора  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  в гидростатических условиях в P-T области температур 36-300К и давлений 0-56 ГПа. Среда, передающая давление – неон.

Проведены синхротронные рентгенографические исследования структуры SnTe при комнатной температуре и при высоких давлениях в условиях квазигидростатического сжатия до 193.5 ГПа, создаваемых в камерах с алмазными наковальнями. Обнаружены два структурных фазовых перехода при  $P \approx 3$  и  $\approx 23$  ГПа. Первый фазовый переход сопровождается скачкообразным уменьшением объёма элементарной ячейки на 4% в результате ромбического искажения исходной кубической структуры SnTe-B1 типа NaCl. В диапазоне давлений 3 – 23 ГПа установлена область сосуществования двух промежуточных ромбических фаз SnTe с пространственной группой *Cmcm* и *Pnma*. При 23 ГПа обнаружен второй фазовый переход из промежуточной ромбической модификации в кубическую фазу SnTe-B2 со структурным типом CsCl. Этот переход сопровождается скачкообразным уменьшением объёма ячейки на 8%. Построена зависимость удельного объёма элементарной ячейки от давления при комнатной температуре.

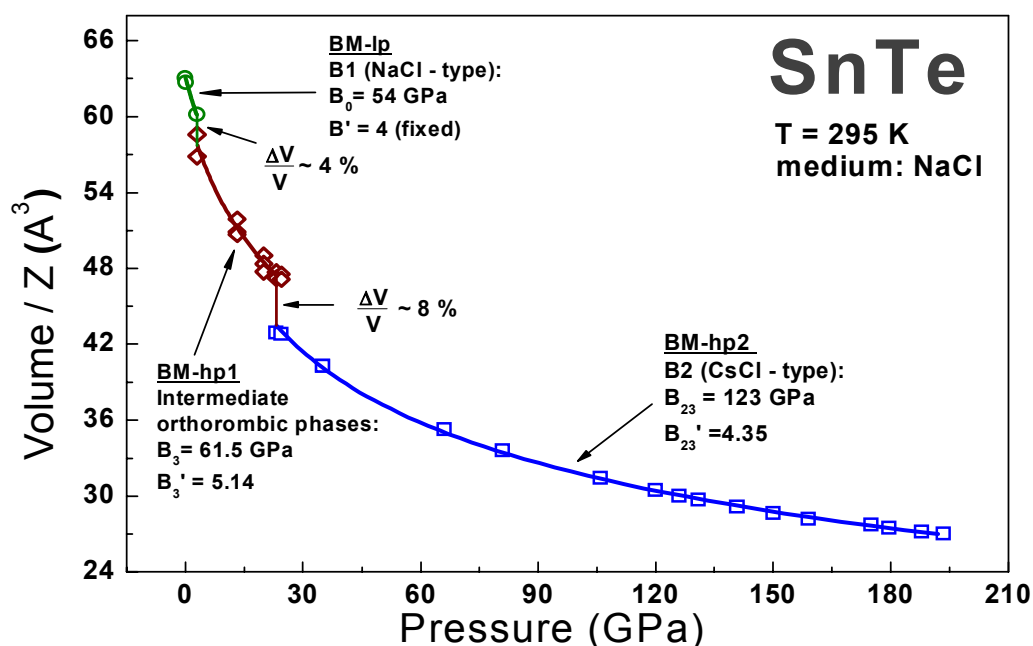


Рисунок 25 - Зависимость от давления объема  $V$  элементарной ячейки, приведённого на формульную единицу ( $Z$ ), в соединении SnTe. Показана аппроксимация экспериментальных точек (кружки – SnTe-B1, ромбы – промежуточных ромбических фаз  $Pnma$  и  $Cmcm$ , квадраты – SnTe-B2) уравнениями состояния в форме Бёрча-Мурнагана. Показан первый фазовый переход (hp1) со скачком объёма на 4% из кубической структуры SnSe-B1 (структурный тип NaCl) в ромбическую модификацию SnTe ( $Pnma + Cmcm$ ) и второй фазовый переход при 23 ГПа (hp2) в кубическую структуру SnTe-B2 (структурный тип CsCl) со скачком объёма на 8%.

Проведены синхротронные рентгенографические исследования структуры элементного олова Sn при комнатной температуре и при высоких давлениях в условиях квазигидростатического сжатия до 230 ГПа, создаваемых в камерах с алмазными наковальнями. Обнаружен структурный фазовый переход при  $P \approx 160$  из ОЦК в ГПУ структуру. Фазовый переход имеет большой гистерезис. ОЦК и ГПУ фазы сосуществуют вплоть до максимального давления в эксперименте (230 ГПа).

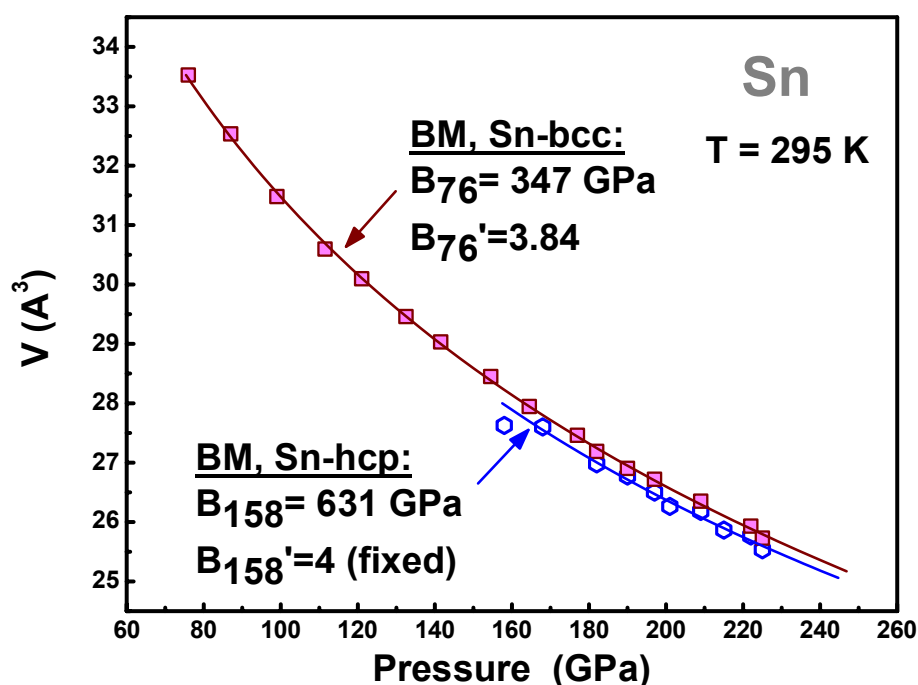


Рисунок 26 - Уравнение состояния V-P при комнатной температуре Sn для ОЦК и ГПУ фаз при увеличении давления в диапазоне давлений от 76 до 230 ГПа, рассчитанная по набору измерений XRD с различными передающими давлением средами. Символы - экспериментальные точки.

Линии показывают аппроксимация, к уравнению состояния в форме Берча-Мурнагана 2-го порядка. При давлениях, превышающих начало перехода ОЦК-ГПУ, наблюдается сосуществование ОЦК и фазы ГПУ.

## **1.6 Модернизация протонной лучевой установки, включая систему позиционирования пациента.**

Целью исследований и работ по модернизации протонной лучевой установки Комплекса протонной терапии (КПТ) ИЯИ РАН, проведенных в 2017 году было:

- Обеспечение качества формирования пучка с помощью системы двойного рассеяния для протонов с энергией 127-209 МэВ в новых условиях управления медицинским каналом Мезонной фабрики ИЯИ РАН.

- Модернизация позиционера пациента с целью повышения точности и надежности позиционирования пациента при облучении.

- Методические работы по обеспечению контроля формирования медицинского пучка протонов на основе системы двойного рассеивания при контроле параметров пучка с помощью водного фантома «PTW T41029» с программным обеспечением «Merphysto mc<sup>2</sup>».

- Разработка и изготовление новых устройств для обеспечения формирования индивидуальных терапевтических пучков (юстирующие устройства, устройства управления затворами, модуляторы энергии и др.).

- Обеспечение точности модуляции энергии с помощью гребенчатых фильтров с модуляциями модифицированного пика Брэгга в диапазоне 25-50мм, рассчитанных по разработанной программе FilterCalc с симуляцией пробега протонов в веществе по программе SRNA, использующей алгоритмы метода Монте-Карло.

### Используемое и вновь разработанное оборудование КПТ.

Схема формирования протонного медицинского пучка показана на рисунке 27. Пучок протонов выходит из ионопровода через мембрану толщиной 1,045 мм Al и проходит через отверстие в графитовом коллиматоре диаметром

10 мм и длиной 280 мм. Отверстие сделано в графитовом кубе, установленном вблизи выходного окна ионопровода.

На выходе из коллиматора устанавливается первичный рассеиватель из медной фольги, его толщина равна 400 мкм для энергии протонов 209 МэВ и 100 мкм для 160 МэВ

Далее пучок проходит через отверстие в биологической защите диаметром 10 см и длиной 120 см, на выходе из которого установлен вторичный профилированный рассеиватель из меди с профилированным замедлителем из плексигласа, позволяющим добиться одинаковых потерь энергии протонов во всем сечении пучка. Системы двойного рассеяния были спроектированы с помощью программы NEUJ и подробно описаны в отчетах о предыдущих сеансах подачи пучков протонов на КПТ. После взаимодействия с вторичным рассеивателем пучок протонов проходит через плоскопараллельную ионизационную камеру-монитор модели 786 (PTW Freiburg), установленную на оптической скамье, гребенчатый фильтр затем попадает в водный фантом

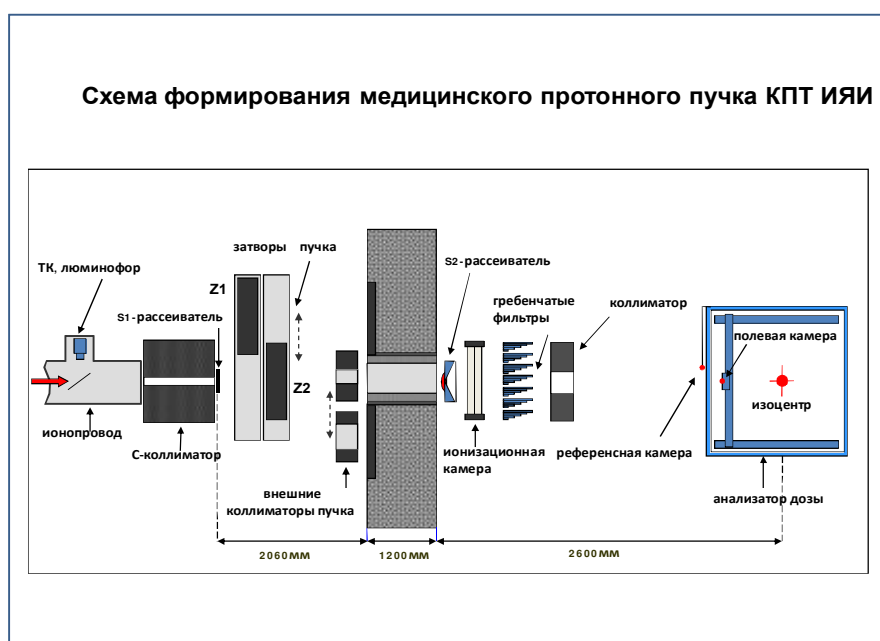


Рисунок 27 - Система формирования медицинского протонного пучка в КПТ ИЯИ.



Измерения распределений поглощенной дозы в воде фантома выполняются с помощью анализатора дозы МРЗ-Р Т41029, включающего водный фантом из акрила с внутренним размером 448x480x350мм<sup>3</sup>, механизм перемещения детектора в фантоме, осуществляющего перемещения с точностью 0,1 мм, две ионизационные камеры (полевая и референсная), двухканальный электрометр для измерения ионизационного тока камер, блок управления перемещением детектора и управляющий компьютер. Полевая камера по заданной программе перемещается внутри фантома для измерения поглощенной дозы в различных его точках, референсная камера закреплена снаружи фантома в пределах пучка протонов. Регистрировалось отношение полевой и референсной камер (цифровое деление сигналов), что позволяло минимизировать влияние временной нестабильности пучка на результаты измерений. Характеристики ионизационных камер описаны в предыдущих отчетах Лаборатории медицинской физики.

В качестве референсной камеры использовалась ионизационная камера IC-10 объемом 0,14 см<sup>3</sup> наперсткового типа. В качестве полевой камеры при измерении профилей и глубинных доз использовалась плоскопараллельная камера Advanced Markus Chamber Type 34045 объемом 0.02 см<sup>3</sup>.

Горизонтальный пучок протонов попадает в водный фантом через боковую стенку толщиной 5мм (материал РММА); оси и нулевое положение детектора в фантоме совмещается с геометрической осью пучка с помощью лазерного нивелира по геодезическим меткам. Расстояние между плоскостью входного окна полевой камеры и внутренней стенкой фантома составляло 20мм. Плотность входного окна камеры вместе с защитным водонепроницаемым кожухом составляет 106мг/см<sup>2</sup>.

Для измерений интенсивности сформированного пучка и отсчета мониторинговых единиц используется проходная плоскопараллельная камера модели 786 (PTW Freiburg), используемая совместно с клиническим дозиметром Multidos.

Камера устанавливается на оптической скамье на расстоянии 10 см от вторичного рассеивателя.

В дополнение к описанному оборудованию, в 2017 году разработано и смонтировано следующее оборудование (с разбиением по системам КПП).

- 1) Система позиционирования пациента. Для этой системы разработано, изготовлено и поставлено:
  - Модернизация электронного блока управления сервоприводами позиционера пациента.
  - Обновление программы управления позиционером пациента.
- 2) Система формирования пучка протонов. Для этой системы разработано, изготовлено и поставлено:
  - 3-х позиционный привод первичного рассеивателя протонов.
  - Блок управления приводом первичного рассеивателя протонов.
  - 2-х координатный привод вторичного рассеивателя протонов с установочным рейтером.
  - Блок управления приводом вторичного рассеивателя.
- 3) Система затворов пучка протонов. Для этой системы разработано, изготовлено и поставлено:
  - Механические блоки рабочего и аварийного затворов пучка.
  - Блок управления и управляющий компьютер с платой цифрового ввода/вывода для управления работой затворов.
- 4) Система поворотного стола для размещения оборудования лучевой установки. Для этой системы разработано, изготовлено и поставлено:
  - Механический блок поворотного с установочным рейтером для размещения оборудования.
  - Блок управления поворотным столом.
- 5) Сервер для размещения управляющих программ.

Разработанное и установленное в 2017 году оборудование отвечает следующим техническим требованиям.

- 1) По системе позиционирования пациента:

- позиционер пациента должен воспроизводить заданное положение с ошибкой не более 0,1мм по любому из четырех перемещений кресла или стола пациента (3 линейных перемещения и 1 вращательное в горизонтальной плоскости).

2) По системе формирования пучка протонов:

- 3-х позиционный привод первичного рассеивателя протонов, установленного на срезе графического коллиматора, должен иметь шаг перемещения 70 мм, погрешность его перемещения не более 0,1 мм, управление перемещением рассеивателя дистанционное и ручное;
- 2-х координатный привод вторичного рассеивателя протонов с установочным рейтером, размещенным на оптической скамье, должен иметь диапазоны перемещения 150 мм по горизонтали и 30 мм по вертикали, окно рейтера для размещения рассеивателя 90x90 мм, шаг перемещения- 0,1 мм, управление перемещением дистанционное ручное.

3) По системе затворов пучка:

- Затвор размещается у входа в коллимирующее-защитное устройство лучевой установки;
- Область перекрытия пучка 200x200 мм;
- Количество блоков затвора – 2,
- Масса 1 блока затвора 15кг,
- Количество положений затвора – 4 (открыто, закрыто одним блоком, закрыто 2-мя блоками и закрыто 2-мя блоками с блокировкой);
- Время срабатывания затвора – 0,5 сек;
- Управление затвором – программное и дистанционное ручное.

4) По системе для размещения оборудования (поворотный стол):

- Место установки – оптическая скамья;
- Диапазон поворотов – 360 °;
- Шаг поворота – 0,9 °;
- Управление перемещением – дистанционное ручное.

5) По серверу для размещения управляющих программ.

- Конфигурация сервера должна быть не хуже следующей: Intel Xeon E5-2470 (8-core 20M Cache, 2.30GHz), 4Gb Single Rank RDIMM 1600 MHz , корзина на 8 дисков 2.5 ", 600 Gb SAS 6 Gbps 10k 2.5" HD Hot Plug, PERC H310 Raid Controller, Power supply (1PSU) 350 W Hot Swap.

### **Выводы.**

Все разработанное и установленное в 2017 году оборудование показало свою работоспособность и соответствует вышеуказанным техническим требованиям. Проведенные испытания вновь установленного оборудования КПТ позволили сделать следующие выводы.

- Время, необходимое на измерения всех параметров пучка протонов при энергии 209Мэв и 160 Мэв составляет ~ 1час 10мин. Точность измерений пучков соответствует заложенным требованиям.
  - Подтверждена сильная зависимость формы (плато) глубинных дозовых распределений (пика Брэгга) от угла падения протонов на гребенки фильтра. Это подтвердило важность установленных устройств для тонкой настройки положения индивидуальных формирующих устройств.
- Подтверждена сильная зависимость формы (плато) глубинных распределений от параллельности траекторий падающих протонов. Крайне важна строгая коллимация пучка на входе и выходе защиты, а также перед гребенчатым фильтром.
- Устройства юстировки вторичного рассеивателя прекрасно показали себя в работе, существенно ускорив и упростив процедуру настройки положения рассеивателя.
- При расчете гребенчатых фильтров следует применять одну (эффективную) энергию протонов, поскольку форма плато сохраняется при переходе на другую энергию, а меняется только интервал пробегов в соответствии с энергией протонов.

Эти результаты будут использованы при подготовке и проведении доклинических и клинических испытаний протонной лучевой установки КПТ

ИЯИ. Перечисленные выводы включены в новые публикации в научных журналах.

## **1.7 Оборудование участка диффузионной сварки для производства ториевых мишеней в металлических оболочках**

### Назначение и использование мишеней

Мишени из металлического тория предназначены для получения актиния-225, а также радия-223 и других медицинских радионуклидов [Б. Л. Жуйков и др. Получение актиния-225 и радия-223 при облучении тория ускоренными протонами. Радиохимия, 2011. Т. 53. №1. С. 66-72].

Для этого мишени облучают на ускорителе протонов средних энергий, в частности на отводе пучка протонов с энергией 160 МэВ линейного ускорителя ИЯИ РАН. Во время облучения в ИЯИ РАН мишень, установленная вертикально в пазах из сверхпрочного графита, обычно располагается под углом  $26^\circ$  к пучку (возможно некоторое изменение угла), причем мишень со всех сторон охлаждается интенсивным потоком воды. Мишень представляет собой пластинку металлического тория в защитной оболочке. Энергия протонов на металлическом тории - примерно 140-80 МэВ, ток пучка протонов – около 100 мкА или выше, энерговыделение – около 6-7 кВт в пятне пучка диаметром около 10 мм по оси Y и 23 мм по оси X.

Основные параметры используемой установки для облучения мишени приведены в [Б.Л.Жуйков и др. Установка для производства радионуклидов на отводе пучка 160 МэВ Московской мезонной фабрики. Радиохимия, т. 36, 1994, с.499-504; B.L.Zhuikov et al. Target Irradiation Facility and Targetry Development at 160 MeV Proton Beam of Moscow Linac. Nuclear Instrument & Methods in Physics Research, A438 (1999), p.173-179], а требования к технологии изготовления ториевой мишени в патенте [Б.Л.Жуйков и др. Способ получения актиния-225 и изотопов радия и мишень для его осуществления (варианты). Патент РФ. № 2373589, 23.09.2008, БИ №32, 2009].

### Исходные детали установки

1. Основной материал мишени – монолитный плавленный торий высокой чистоты не хуже 99,9%.

2. Прессованный порошкообразный торий неприемлем. Пластика из металлического тория может иметь толщину 3,0-3,5 мм (толщина одной пластики варьируется в пределах не более  $\pm 10$  мкм). Другие размеры пластики могут варьироваться в более широких пределах.

Оптимальная – эллипс с диаметрами 24 и 55 мм. Допустимо – круг с диаметром максимум 47 мм или прямоугольник шириной 43-55 мм, высотой – 19-24 мм и др. Чистота обработки поверхности тория - полировка по 3 классу. Поверхность не должна быть окислена. Масса тория – около 30 г.

3. Оболочка мишени может изготавливаться либо из металлического ниобия, либо из горячекатанного молибдена, покрытого никелем с внешних сторон. Способ покрытия молибдена никелем - диффузионная сварка по поверхности (см. ниже), ее можно проводить одновременно с приваркой молибдена к торью. Электрохимическое или карбонильное покрытие не обеспечивает достаточно плотный слой, который может отставать при облучении на ускорителе. Выбор материала оболочки обусловлен тем, что ниобий и молибден слабо взаимодействуют с торием при высокой температуре, а никель предохраняет молибден от взаимодействия с охлаждающей водой во время облучения. Другие металлы (например, нержавеющая сталь), а также графит, имеют ряд недостатков и подходят хуже, хотя также рассматривались и испытывались.

Металлический ниобий показал свою эффективность в качестве оболочки для мишеней других типов и не разрушается водой при облучении.

Молибден имеет лучшую теплопроводность, и оболочку из молибдена легче удалить при последующей химической переработке, растворяя ее и не затрагивая при этом торий. Однако молибден разрушается охлаждающей водой во время облучения протонами. Поэтому его необходимо покрывать никелем в области воздействия пучка протонов. Молибден часто имеет дефекты, которые могут привести к разгерметизации мишени, он также более хрупкий, чем ниобий.

4. Для оболочки мишени требуется горячекатанный материал высокого качества. Поверхность не должна быть окислена.
5. Корпус оболочки мишени представляет собой кольцо – круглое или эллипсообразное, или прямоугольное (в случае круглой мишени максимальный внешний диаметр может составлять 55 мм, меньший диаметр возможен), куда затем плотно вставляют пластинку металлического тория без зазоров (зазоры везде - не более 20 мкм), причем должен быть обеспечен контакт всей боковой поверхности тория и корпуса оболочки. Чистота обработки поверхности по 3 классу. Толщина кольца не должна отличаться и должна в точности (до 10 мкм) совпадать с толщиной ториевой пластинки. Ширина кольца оболочки должна составлять примерно 4-5 мм, и форма внутреннего отверстия кольца зависит от формы ториевой пластинки.
6. Входное и выходное окна мишени представляют собой катанные фольги из ниобия или молибдена толщиной 50-70 мкм. В случае применения молибдена внешняя сторона входных окон покрывается никелевой фольгой толщиной около 50 мкм.

#### Проведение сварки

1. Первый этап сварки – диффузионная сварка. Этот вид сварки совершенно необходим для достижения плотного контакта тория и оболочки мишени не только после изготовления мишени. Хороший контакт также необходим во время и после облучения мишени высокоинтенсивным пучком протонов. В противном случае возможно отслоение оболочки от тория, вздутие мишени, ухудшение охлаждения тория и, как результат, разгерметизация мишени, что абсолютно недопустимо.
2. Перед проведением диффузионной сварки пластинку тория плотно вставляют в кольцо корпуса оболочки мишени и накрывают с обеих сторон очищенными фольгами (входные окна), причем форма фольг соответствует форму кольца. В случае молибденовой оболочки, никелевые фольги располагаются извне так, чтобы молибден контактировал с торием, а никель – с охлаждающей водой. Контакт воды и боковой молибденовой поверхности кольца корпуса оболочки – допускается.
3. Условия проведения диффузионной сварки следующие:

- **Вакуум:** не хуже  $10^{-4}$  мм рт. ст. - до начала нагревания), и не хуже  $10^{-3}$  мм рт. ст - во время нагревания при высокой температуре.

- **Температура** свариваемой детали: 800-1200°C (уточняется в процессе разработки технологии).

- **Давление** гидравлического пресса на свариваемую деталь (постоянно действующее во время проведения сварки): около 200-300 кГ/см<sup>2</sup>, т.е. общее давление на деталь в случае, например, сварки круглой мишени диаметром 50 мм - 5-6 тонн. Давление уточняется в процессе разработки технологии. Т.о., желательно, чтобы гидравлический пресс обеспечивал усилие около 10 тонн, так как площадь и давление могут варьироваться. Между штоком пресса и деталью для предотвращения их взаимодействия помещается прокладка из слюды 60-70 мкм.

- **Время** проведения сварки при максимальной температуре – вероятно 20-30 мин. (уточняется в процессе разработки технологии).

4. Дополнительные условия к установке для диффузионной сварки следующие:

- Откачка вакуума (существенно – при нагревании) должна проходить через сменный фильтр и сбрасываться в спец. вентиляцию, имеющуюся в здании.

- Должен быть обеспечен контроль и стабилизация температуры нагреваемой детали: относительная точность не хуже  $\pm 20^{\circ}\text{C}$ .

- Давление должно контролироваться с точностью не хуже 5% (относительное).

- Потребление охлаждающей воды должно быть по возможности минимизировано и по возможности обеспечена ее циркуляция.

- Установка должна иметь по возможности полную комплектацию всех систем.

5. Второй этап сварки – дополнительные упрочнение и герметизация по окружности кольца корпуса оболочки с помощью лазерной сварки.



При этом накладываются дополнительные укрепляющие кольца шириной около 4 мм и толщиной около 0,4-0,5 мм. Взамен лазерной сварки возможно применение хорошо регулируемой электроннолучевой сварки. Во время проведения этой сварки по окружности центральная часть мишени охлаждается медными блоками.

Варианты конструкции и сварки показаны на рисунках 28-30 - относительно простые варианты круглой конструкции мишени. На рисунке 30 показан более сложный, но более выгодный при облучении и хорошо зарекомендовавший себя вытянутый вариант мишени с Г-образным окном и Г-образной рамкой. Выбор варианта зависит от параметров и качества сварки, а также от поведения материала в процессе сварки.

#### Контроль качества

1. Изготовленная мишень не должна иметь внешних повреждений, глубоких царапин и дефектов на входных окнах, обнаруживаемых под лупой.

2. Поверхность мишени, особенно поверхность входных окон, не должна быть окислена.

3. Не должно наблюдаться никакого, даже легкого вздутия после приварки входных окон, окно не должно «гулять»; не должно быть видно никаких щелей и неоднородностей в сварном шве.

4. После изготовления мишени она подвергается тесту на электропроводность в погружаемой дистиллированной воде при нагревании. Обычно исходная электропроводность воды  $(4-5) \cdot 10^{-8}$  См/см при комнатной температуре и около  $1 \cdot 10^{-7}$  См/см – при 70°C. Она не должна существенно возрасти при сканировании сварного шва датчиком электропроводности под водой.

- В течение 15 мин. нагревания при 85°C не должно наблюдаться газовыделение.

- После кипячения при 100 °C в течение 20 мин. внешний вид мишени не должен изменяться.

- Повторный тест на электропроводность также должен быть проведен после кипячения.

- Результаты теста регистрируются.

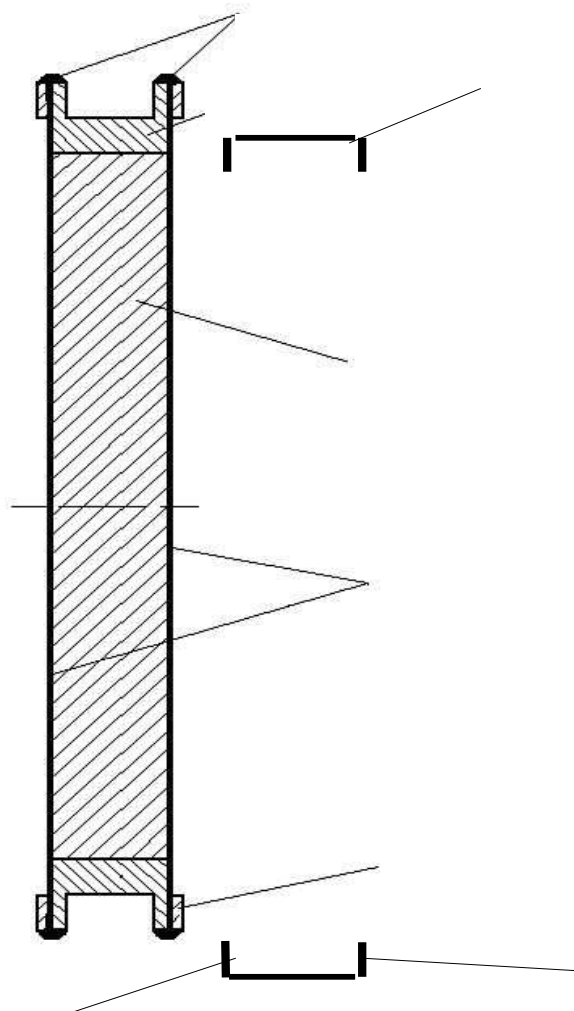


Рисунок 28 - Пример круглой конструкции мишени с металлической оболочкой с дополнительной герметизацией по плоскости корпуса оболочки.

- 1 – корпус оболочки из ниобия или горячекатаного молибдена;
- 2 – входное (выходное) окно пучка – фольга из ниобия или молибдена, покрытого никелем;
- 3 – диск металлического тория, приваренный к окнам диффузионной сваркой;
- 4 – укрепляющие ниобиевые или молибденовые кольца;
- 5 – шов электронно-лучевой или лазерной сварки укрепляющего кольца.

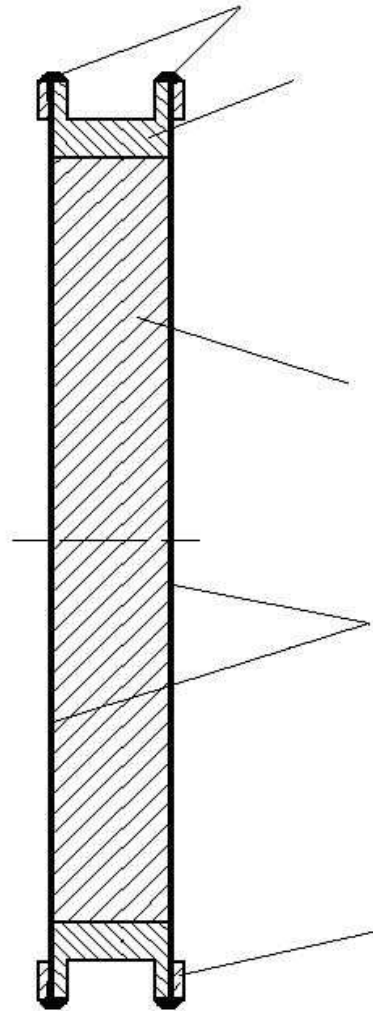


Рисунок 29 - Пример круглой конструкции мишени с металлической оболочкой с дополнительной герметизацией по ребру корпуса оболочки.

- 1 – корпус оболочки из ниобия или горячекатаного молибдена;
- 2 – входное (выходное) окно пучка – фольга толщиной 100 мкм из ниобия или молибдена, покрытого никелем;
- 3 – диск металлического тория, приваренный к окнам диффузионной сваркой;
- 4 – укрепляющие ниобиевые или молибденовые кольца;
- 5 – шов электронно-лучевой или лазерной сварки.

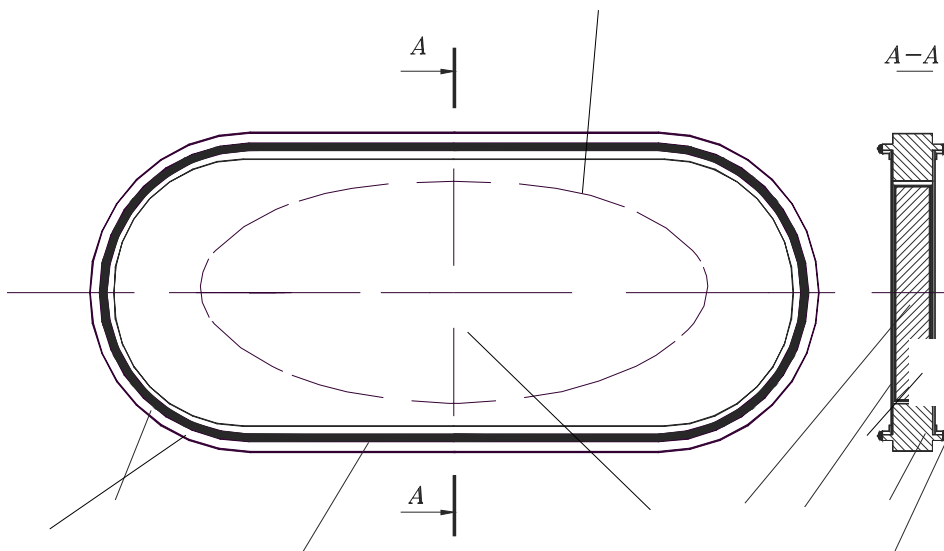


Рисунок 30 - Пример вытянутой конструкции мишени с оболочкой с Г-образным окном.

- 1 – корпус оболочки,
- 2 – эллипсообразная пластина из металлического тория,
- 3 – Г-образное входное окно,
- 4 – шов лазерной или электронно-лучевой сварки,
- 5 – Г-образная укрепляющая штампованная рамка.

### РАЗРАБОТКА НОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДИФфуЗИОННОЙ СВАРКИ

Установка состоит из двух частей: компрессионного узла и термовакуумного стенда. Были разработаны технические задания для изготовления этого уникального оборудования.

#### Техническое задание на изготовление компрессионного узла для установки диффузионной сварки

Компрессионный узел предназначен для создания необходимого давления для диффузионной сварки мишеней в металлической оболочке, содержащих природный торий (далее изделие). Компрессионный узел работает в вакуумном объеме при температурах, необходимых для диффузионной сварки изделий.

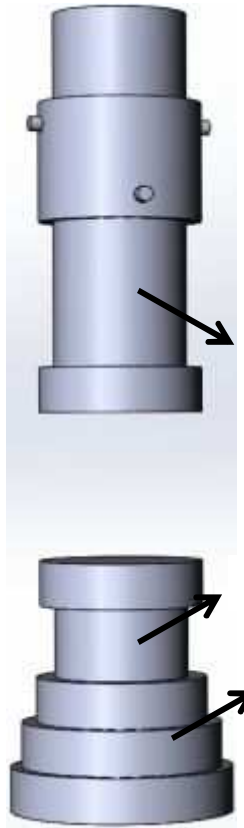
При этих температурах и необходимом давлении материал, из которого изготавливается компрессионный узел, должен сохранять свою конструктивную прочность.

Температура свариваемой детали: 1200 - 1500°C (уточняется в процессе разработки технологии). Требуемое давление уточняется в процессе разработки технологии. Материал стержней во время нагрева и давления не должен течь.

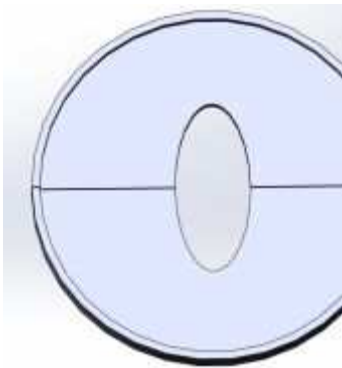
Компрессионный узел представляет собой цилиндрические стержни нагружения (далее стержни), работающие в условиях высоких температур и давлений, усилие на которые передается механическим способом. Ориентировочный материал стержней – высокопрочный графит. Давление передается через сильфон высокотемпературного вакуумного стенда (далее стенд) на верхний стержень. Нижний стержень закрепляется на нижнем основании стенда и с помощью центровочных колец ориентируется соосно относительно верхнего стержня. Центровочные кольца обеспечивают соосность стержней и предотвращают излом нижнего стержня в процессе диффузионной сварки. Для уменьшения теплоотвода от поверхности свариваемого изделия в нижнем и верхнем стержне делаются отверстия вдоль образующих. Стержни должны выдерживать на сжатие давление, необходимое для диффузионной сварки изделия.

В качестве корпуса мишени предполагается несколько различных вариантов: круг, прямоугольник, эллипс. Для каждого корпуса изготавливается технологическая оснастка, обеспечивающая соосность стержней и изделия в процессе диффузионной сварки. Ориентировочный материал оснастки – молибден, графит. Для компенсации возможных перекосов изделия оснастка состоит из двух симметричных частей. Форма оснастки может быть изменена в процессе конструирования.

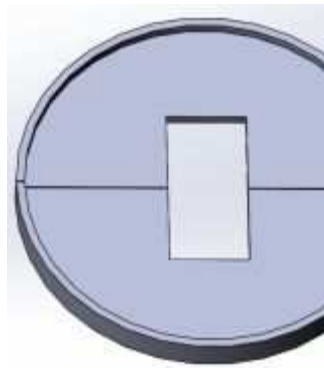
Торцевые поверхности стержней имеют высокотемпературное покрытие, замедляющее процесс взаимодействия материала оболочки изделия (Nb) с материалом стержней, и замедляющее процесс теплоотвода от изделия.



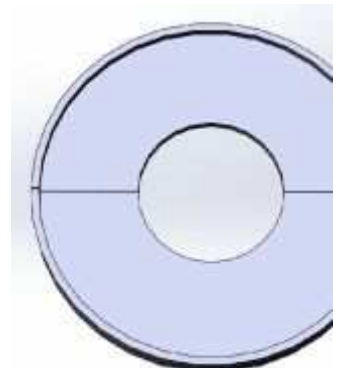
1,2 – стержни, 3 – центровочные кольца  
 Ориентировочное конструктивное исполнение стержней



Корпус мишени в виде эллипса 24x55 мм



Корпус мишени в виде прямоугольника 50x24 мм



Корпус мишени в виде круга диаметром 47 мм

Рисунок 31 - Виды оснасток в зависимости от корпуса оболочки мишени

Компрессионный узел будет работать в комплекте с высокотемпературным вакуумным стендом для осуществления диффузионной сварки с целью изготовления мишеней для получения радионуклидов медицинского назначения на линейном ускорителе протонов.

Компрессионный узел должен включать:

- Стержни нагружения – 2 шт.;
- Комплект центровочных колец – 1 шт.;
- Комплект технологической оснастки – 3 шт.;

Компрессионный узел должен отвечать следующим характеристикам:

- Стержни нагружения должны выдерживать давление на сжатие, не менее: 40 Мпа;
- Длительная рабочая температура стержней нагружения, не менее: 1500°C;
- Материал, из которого изготовлен компрессионный узел должен быть совместим с графитом;
- Ресурс работы компрессионного узла, не менее: 400 часов;
- Конструктивное исполнение должно обеспечивать однозначную соосность верхнего и нижнего стержней нагружения;
- Технологическая оснастка должна обеспечивать соосность стержней нагружения и мишени;
- Наличие высокотемпературного покрытия на торцевой поверхности стержней нагружения, замедляющее процесс взаимодействия материала оболочки мишени (Nb) с материалом стержней нагружения.

Техническое задание на термовакуумный стенд на базе высокотемпературной вакуумной печи «Термионик» для установки диффузионной сварки

Термовакуумный стенд должен включать:

- Камера вакуумная – 1 шт.;
- Система нагружения – 1 шт.;
- Система управления на базе промышленного контроллера типа Siemens-S7 с автоматическим и ручным режимами – 1 шт.;

- Понижающий трансформатор – 1 шт.;
- Компьютер с сенсорным монитором 21 дюймов – 1 шт.;
- Вакуумная система, включающая:
  - Широкодиапазонный вакуумметр – 1 шт.;
  - Форвакуумный пластинчато-роторный насос – 1 шт.;
  - Высоковакуумный диффузионный насос – 1 шт.;
  - Регулятор расхода газа – 1 шт.;
  - Датчик давления – 1 шт.;
  - Вакуумная запорная арматура – 1 комплект;
- Комплект нагревателей – 1 комплект;
- Термопара – 1 шт.;
- Паспорт и руководство по эксплуатации на русском языке;

Термовакuumный стенд должен отвечать следующим техническим характеристикам:

- Моноблочное исполнение (трансформатор, электротехническое оборудование и коммуникации между ними расположены в корпусе стенда). Корпус включает стальную раму и защитные панели, окрашенные порошковой краской. Стенд имеет колеса для локальных перемещений и опоры для стационарной установки;
- Максимальная рабочая температура, °C – 1800;
- Точность регулирования температуры –  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ;
- Максимальная скорость нагрева – не менее  $20^{\circ}\text{C}$ ;
- Диаметр рабочей зоны – 90 мм;
- Тип системы нагружения – гидравлическая;
- Максимальное усилие гидроцилиндра – 60000 кг;
- Максимальный ход гидроцилиндра – 80 мм;
- Вакуумная камера изготовлена из нержавеющей стали 12X18H10T и состоит из цилиндрической части с рубашкой охлаждения, а также охлаждаемых фланцев;
- Подвод охлаждающей воды осуществлен с использованием нержавеющей гибкой трубы или полиамидной (или полиуретановой) гибкой трубки;
- Токовводы, питающие нагреватели – водоохлаждаемые;



- 
- Тепловая зона включает цилиндрический нагреватель, выполненный из графита, боковой, верхний и нижний экранные блоки.
- Схема загрузки – боковая через открывающийся фланец вакуумной камеры.
- Вакуумная камера имеет ввод для установки дополнительной термопары;
- Среда в рабочем пространстве – вакуум или инертная атмосфера (технические газы);
- Вакуумная система включает:
  - диффузионный насос с быстротой действия при давлении  $7,5 \times 10^{-5}$  мм рт. ст. не менее 2700 л/с;
  - двухступенчатый пластинчато-роторный форвакуумный насос с быстротой действия не менее 40 м<sup>3</sup>/час, предельным остаточным давлением не хуже  $3 \times 10^{-3}$  мм рт. ст., габаритными размерами не более ДхШхВ 250х650х350. Насос оборудован ловушкой паров масла.
  - широкодиапазонный вакуумметр с диапазоном измерения не хуже  $5 \times 10^{-8} \dots 1000$  мбар;
  - вакуумметр Пирани с диапазоном измерения от  $10^{-3}$  до 1000 мбар;
  - регулятор расхода газа с диапазоном регулирования от 0 до 900 л/час;
  - датчик давления газа с диапазоном от 0 до 0,16 МПа;
- Подача технических газов в вакуумную камеру осуществляется через регулятор расхода газа, давление измеряется датчиком давления;
- Система управления (управление всеми вакуумными агрегатами, мощностью нагревателей, подачей технических газов, а также электромеханическими элементами) реализована на базе промышленного контроллера Siemens-S7;
- Стенд оснащен сенсорным экраном размером не менее 21 дюйм;
- Программное обеспечение выполняет следующие функции:
  - отображение схемы вакуумной системы стенда с основными рабочими параметрами (температура в рабочей зоне, вакуум в рабочей зоне, а также в диффузионном насосе, температура

- нагревателей диффузионного насоса, скорость потока и давление технического газа);
  - управление вакуумными клапанами (осуществляет открывание/закрывание и мониторинг фактического состояния клапанов по каналу обратной связи с выводом ошибки в случае отказа клапана);
  - управление вакуумными насосами (осуществляет включение/отключение насосов);
- Программное обеспечение имеет следующие рабочие экраны:
    - Основной экран со схемой вакуумной системы стенда;
    - Экран редактирования рабочей программы;
    - Экран графической визуализации термического процесса;
    - Экран настроек;
  - Переключение между экранами осуществляется нажатием соответствующей кнопки/закладки;
  - Программирование термического процесса осуществляется путем задания температуры, включения/отключения откачки и напуска технических газов, а также длительности каждого из этапов(шагов) термического процесса на экране редактирования рабочей программы;
  - Программное обеспечение позволяет сохранять и считывать файлы, содержащие программы термических процессов (формат программ -json, количество сохраняемых программ не ограничено);
  - На экране графической визуализации термического процесса отображаются заданная программой циклограмма, расчетное и фактическое значение температуры, а также уровень вакуума/давления в камере;
  - Программное обеспечение позволяет сохранять протокол проведенного термического процесса в формате xml с возможностью непосредственного (без преобразования формата) открытия в MS Excel;
  - Ручной режим управления позволяет оператору самостоятельно управлять состоянием вакуумных агрегатов (включение/отключение клапанов и насосов);
  - Автоматический режим управления обеспечивает полностью

- автоматическое (заданное программой) управление всеми активными элементами станда (вакуумные насосы, клапаны, система нагрева).
- Сервисный режим позволяет осуществлять непосредственное управление мощностью нагревателей станда;
- В процессе работы система управления осуществляет мониторинг расхода и температуры охлаждающей воды, корректной работы клапанов, температуры нагревателей диффузионного насоса и электрического тока нагревателей. При наличии отклонений от критических значений выводится соответствующая ошибка;
- Пользователь имеет возможность отключить блокировки на экране настроек станда;
- В программном обеспечении реализована функция автоматического ограничения нагрева при снижении уровня вакуума в рабочей камере (при интенсивном газовыделении обрабатываемых изделий);
- В ходе выполнения рабочей программы в ручном режиме пользователь имеет возможность приостановить нагрев на требуемое время, при этом температура поддерживается постоянной;
- Пользователь имеет возможность корректировать параметры этапов (шагов) термического процесса, следующих за реализуемым в настоящий момент;
- Измерение температуры осуществляется с помощью термоэлемента типа А (вольфрам-рениевые термопары);
- Мощность станда – не более 63 кВт;
- Параметры питающей сети:
  - Напряжение, В – 380;
  - Частота, Гц – 50;
  - Количество фаз – 3;
- Габаритные размеры станда в закрытом положении (ДхШхВ), не более мм – 2100х1000х1800;
- Масса станда – не более 1500 кг;
- Масса садки – до 5 кг.
- Оборудование должно быть новым, не бывшим в употреблении.

Прототипы мишеней, которые будут изготавливаться на установке  
диффузионной сварки

На уже существующей установке для диффузионной сварки, которую нельзя использовать для изготовления реальной ториевой мишени, были изготовлены прототипы мишеней из металлического иттрия, который по своим свойствам близок к торию.



Рисунок 32 - Изготовленные прототипы мишеней в ниобиевой оболочке с рабочим веществом - металлический иттрий: слева - с укрепляющим кольцом, приваренным электронно-лучевой сваркой, без диффузионной сварки; справа – без укрепляющего кольца, но с диффузионной сваркой (пресс из молибдена).

Мишени были испытаны на установке по вскрытию и будут испытаны на пучке ускорителя в плане их устойчивости при облучении пучком протонов.

### Научные исследования, выполненные на прототипах мишеней, которые затем будут изготавливаться на участке диффузионной сварки

Были проведены научные исследования и представлены публикации, которые описывают эксперименты, выполненные с прототипами мишеней, которые будут изготавливаться на установке для диффузионной сварки: ториевой мишени – для получения актиния-225, изучения наряду с этим выходов продуктов деления, а также генераторов франция-221 и висмута-213 – продуктов распада актиния-225. Кроме того, была выполнена работа и представлена публикация об использовании в ядерной медицине (ПЭТ-диагностика в нейроонкологии) генератора стронций-82/рубидий-82. Стронций-82 для этого генератора получали из мишени металлического рубидия, изготовленной с помощью прототипа установки для диффузионной сварки.

### Экспериментальные сечения образования продуктов деления тория-232 при облучении протонами средних энергий

Изучение деления ядер Th-232, инициированного протонами средних энергий, представляет значительный интерес точки зрения ядерной физики и радиохимии, так как позволяет лучше понять механизмы образования изотопов. Увеличение энергии частиц, взаимодействующих с тяжелыми делящимися ядрами, вызывает изменение массового распределения продуктов деления. При делении ядер частицами низких энергий возникает W-образная форма массового распределения, соответствующая асимметричному делению. Для частиц с энергиями 10-20 МэВ наблюдается появление пика симметричного деления. Конкуренция каналов симметричного и асимметричного деления наиболее ярко проявляется при энергиях частиц, в частности протонов, до 150 МэВ. В то же время представленные в литературе данные для таких энергий заряженных частиц весьма ограничены.

Для экспериментального определения сечений образования продуктов деления тория на линейном ускорителе ИЯИ РАН были облучены ториевые мишени протонами средних энергий.

Чтобы снизить влияние рассеяния пучка протонов на точность определения сечений были проведены два облучения с разными начальными энергиями протонов: 158,5 и 100,1 МэВ, соответственно. Затем были выполнены гамма-спектрометрические измерения облученных фольг с помощью полупроводникового германиевого детектора высокого разрешения и определены активности образовавшихся радионуклидов и вероятности (сечения) их образования.

Проведен анализ полученных экспериментальных данных в сравнении с результатами расчета, выполненного по каскадно-испарительно-делительной модели (CEF), разработанной ранее в ИЯИ РАН. В рамках этой модели взаимодействие протона с ядром рассматривается как процесс, включающий в себя две последовательные стадии. На первой (быстрой) стадии ( $\tau \sim \tau_0$ ) (здесь  $\tau_0 \sim 10^{-22} \text{ с}$  — время пролета быстрой частицы через ядро) взаимодействие налетающего протона с ядром рассматривается как последовательность независимых бинарных взаимодействий с внутриядерными нуклонами и описывается Моделью Внутриядерных Каскадов (МВК). В результате образуется возбужденное остаточное ядро с массой и зарядом, отличающимися от первичного ядра. Вторая стадия (медленная,  $\tau \gg \tau_0$ ), а именно девозбуждение равновесного остаточного ядра, образовавшегося после первой стадии, описывается в рамках статистической модели, включающей в себя конкурирующие процессы испарения и деления при энергии возбуждения меньше 2 МэВ/нуклон и мультифрагментацию при более высоких энергиях возбуждения.

В области симметричного деления (область масс ядер 100-125) наблюдается рост сечений с ростом энергии протонов примерно до 80 МэВ. При дальнейшем увеличении энергии наблюдается небольшое снижение сечений, связанное, по всей видимости, с увеличением числа частиц, испускаемых из ядра на каскадной стадии и, как следствие, с уширением пика ( $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{123}\text{Sn}$  и  $^{124,125}\text{Sb}$ ). В области пиков асимметричного деления сечения падают с ростом энергии во всем диапазоне ( $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{141}\text{Ce}$  и  $^{144}\text{Ce}$ ). Полностью асимметричное деление не может исчезнуть с ростом энергии протонов, так как после каскадной стадии всегда присутствуют ядра с небольшими энергиями возбуждения.

Экспериментально определенные сечения образования радионуклидов удовлетворительно согласуются с результатами расчета. Модель SEF качественно воспроизводит зависимости сечений образования продуктов деления тория от энергии протонов, полученные экспериментально, и может служить основой для понимания процесса деления. На основании расчета, выполненного по данной модели, было построено массовое распределение продуктов деления тория для энергии протонов 141 МэВ, рисунок 33. На график нанесены также экспериментальные сечения кумулятивно образующихся радионуклидов, определенные по гамма-измерениям образцов с выдержкой около года после облучения.

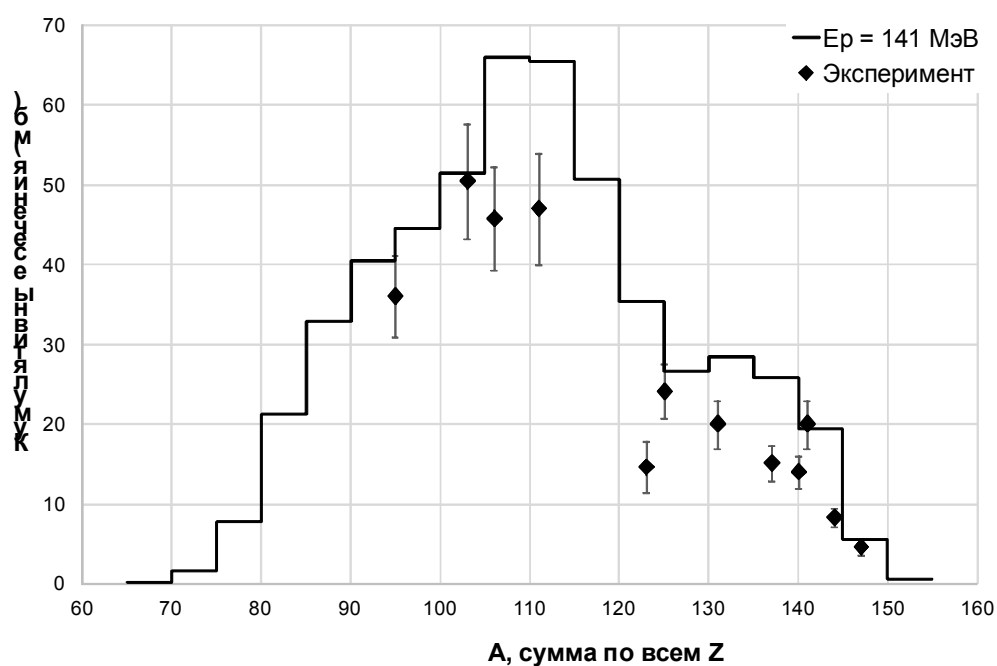


Рисунок 33 - Массовое распределение продуктов деления тория при облучении протонами с энергией 141 МэВ.

Предварительный анализ показывает, что расчетное массовое распределение удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными и свидетельствует о росте доли симметричного канала деления с увеличением энергии протонов. Кроме того, получены сечения образования некоторых нейтронно-дефицитных радионуклидов ( $^{88}\text{Y}$ ,  $^{88}\text{Zr}$ ), находящихся далеко от максимума образования продуктов деления и отделенных от него «хребтом стабильности». Эти данные могут быть полезны для теоретического описания возможных каналов образования подобных радионуклидов.

В настоящее время проводится обработка гамма-спектров, полученных для разных времен выдержки образцов, что позволит идентифицировать несколько десятков радионуклидов с периодом полураспада от нескольких часов до нескольких десятков лет и определить сечения их образования. В итоге мы планируем получить более полные экспериментальные массовые распределения продуктов деления тория и проследить эволюцию симметричного и асимметричного деления в исследуемом диапазоне энергий протонов.

#### Изучение движения генетически связанных радионуклидов $^{221}\text{Fr}$ и $^{213}\text{Bi}$ в хроматографической среде

Хроматографическое поведение франция представляет интерес не только для фундаментальных исследований в связи с тем, что он является самым тяжелым представителем щелочных металлов, но и для практического применения. В последнее время быстро развивается область ядерной медицины, основанная на использовании альфа-излучающих радионуклидов для терапии различных онкологических заболеваний.  $^{225}\text{Ac}$  ( $T_{1/2} = 9.9$  дн) – один из наиболее перспективных радионуклидов, может применяться и напрямую, и как материнский радионуклид в генераторе  $^{213}\text{Bi}$  ( $T_{1/2} = 46$  мин). Поскольку  $^{225}\text{Ac}$  распадается во  $^{221}\text{Fr}$  ( $T_{1/2} = 4.9$  мин), возможно осуществить хроматографическую схему, в которой  $^{213}\text{Bi}$  извлекают посредством отделения и распада промежуточного короткоживущего  $^{221}\text{Fr}$ . Получаемый элюат  $^{213}\text{Bi}$  содержит существенно меньше  $^{225}\text{Ac}$  по сравнению с непосредственным отделением  $^{213}\text{Bi}$  от  $^{225}\text{Ac}$ . Это обстоятельство особенно важно в случае использования  $^{225}\text{Ac}$ , получаемого облучением природного тория протонами средних энергий, поскольку одновременно с  $^{225}\text{Ac}$  образуется около 0.2% долгоживущего  $^{227}\text{Ac}$  ( $T_{1/2} = 21.8$  лет), попадание которого в организм пациента недопустимо.

Для изучения хроматографических свойств изотопа франция использовали сорбенты различных типов. Образцы экстракционно-хроматографических смол, предоставленные фирмой Triskem (Франция) включали: DGA Resin, TRU и Actinide.



Образец композитного ионообменного сорбента AMP-PAN фирмы Triskem представлял собой высокодисперсный фосфомолибдат аммония, внедренный в органическую матрицу на основе полиакрилонитрила для улучшения механических и гидродинамических характеристик. Использовали также катионообменную смолу Dowex 50×8, производства Dow Chemical (США).

Пластины из металлического тория в металлической оболочке толщиной 0.05-1.1 мм облучали на линейном ускорителе ИЯИ РАН пучком ускоренных протонов с энергией 143 МэВ. При облучении ториевые пластины интенсивно охлаждали потоком воды. Энергия протонов, приходящих на ториевую мишень, составляла около 115 МэВ. Процедура извлечения  $^{225}\text{Ac}$  из облученной мишени заключалась в растворении тория в растворе 6 М  $\text{HNO}_3$  с добавлением каталитических количеств HF и последующей экстракции раствором ди-2-ЭГФК в толуоле, при этом  $^{225}\text{Ac}$  оставался в водной фазе. На следующей стадии  $^{225}\text{Ac}$  вместе с фракцией редкоземельных элементов извлекали из водной фазы, адсорбируя на смоле DGA Resin и отделяя от основной массы радионуклидов. После десорбции раствором 0.01 М  $\text{HNO}_3$  проводили окончательную очистку  $^{225}\text{Ac}$ . Полученный раствор с  $^{225}\text{Ac}$  упаривали, остаток растворяли и адсорбировали  $^{225}\text{Ac}$  на хроматографической колонке, заполненной смолой Actinide Resin. Скорость движения  $^{221}\text{Fr}$  в смоле определяли, пропуская через колонку растворы HCl,  $\text{HNO}_3$  и  $\text{HClO}_4$  различной концентрации. Полученные коэффициенты распределения приведены на рисунке 34.

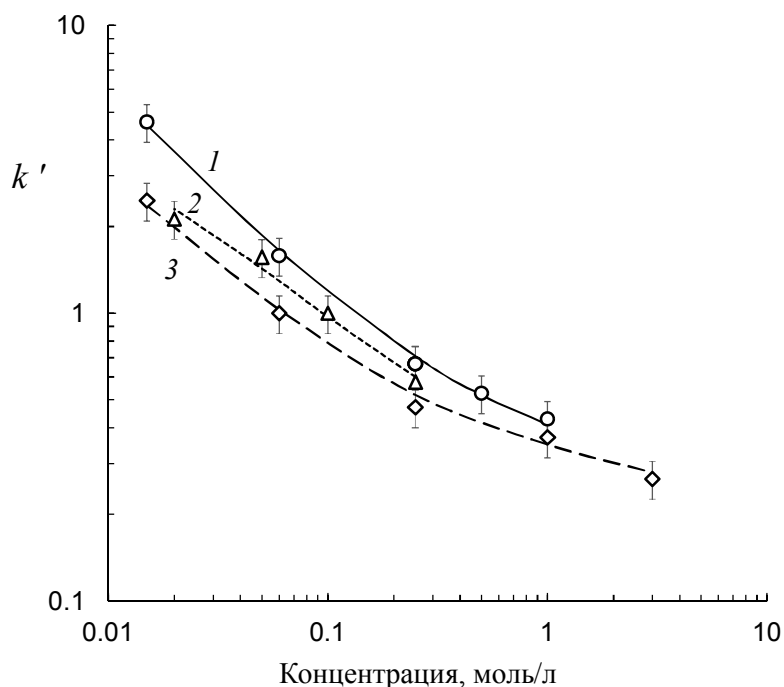


Рисунок 34 - Экспериментальная зависимость коэффициентов распределения  $k'$  Fr(I) при сорбции на смоле Actinide Resin от концентрации кислот. 1 – HCl, 2 – HClO<sub>4</sub>, 3 – HNO<sub>3</sub>.

Благодаря низким значениям коэффициентов распределения колонка с Actinide Resin, содержащая <sup>225</sup>Ac, служила источником <sup>221</sup>Fr для оценки его хроматографического поведения на смолах Dowex 50×8 и AMP-PAN.

Используя комбинации хроматографических колонок, заполненных исследуемыми сорбентами, создавали различные хроматографические системы для изучения движения <sup>221</sup>Fr и <sup>213</sup>Pb при непрерывном отделении от материнского радионуклида <sup>225</sup>Ac. Вариант накопления <sup>213</sup>Pb на колонке, соединенной с материнской колонкой Actinide Resin промежуточным объемом раствора для распада <sup>221</sup>Fr, может служить прототипом <sup>225</sup>Ac/<sup>213</sup>Pb генератора, позволяющего получать элюат <sup>213</sup>Pb высокой чистоты, пригодный для медицинского применения.

### **Исследование возможностей медицинского применения генератора стронций-82/рубидий-82 с позитронно-эмиссионной томографией**

Совместно с РНЦРХТ им. А.М. Гранова (г. Санкт-Петербург) показана возможность использования с ПЭТ радиофармпрепарата “Рубидия хлорид, <sup>82</sup>Rb” для диагностики опухолей головного мозга. <sup>82</sup>Rb получали из генератора <sup>82</sup>Sr/<sup>82</sup>Rb, разработанного в ИЯИ РАН.

Стронций-82 для изготовления генератора получали на линейном ускорителе ИЯИ РАН из мишеней металлического рубидия, изготовленных с помощью прототипа установки для диффузионной сварки.

Выявлена тенденция к преобладанию повышенного накопления РФП в злокачественных новообразованиях, по сравнению с доброкачественными глиомами и артериовенозными мальформациями. Ультракороткий период полураспада радионуклида  $^{82}\text{Rb}$  (76 с) и низкая лучевая нагрузка создают принципиально новую возможность последовательного использования двух или нескольких РФП при обследовании одного больного. Показано, что в ряде случаев применения  $^{82}\text{Rb}$ -хлорида более эффективно в качестве диагностического средства у нейроонкологических больных, чем применение стандартных ПЭТ-препаратов (рисунок 35). По результатам работы подготовлена научная статья, которая направлена в редакции журналов «Brain and Behavior». Это будет способствовать внедрению в широкую медицинскую практику произведенных в России генераторов рубидия-82 в РФ и на Евразийском континенте.

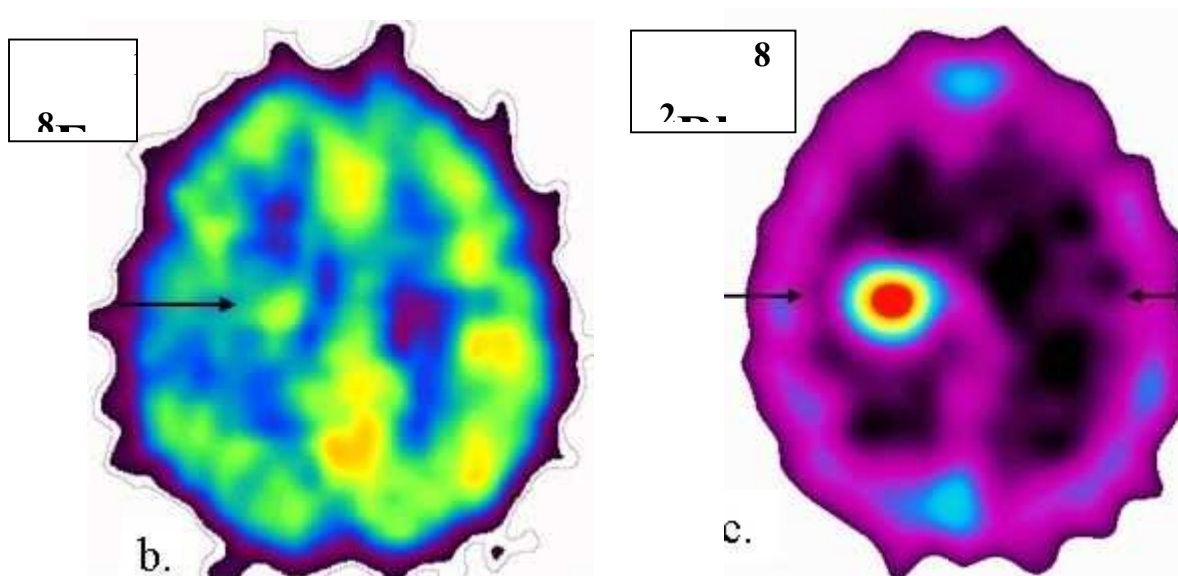


Рисунок 35 - Данные обследования пациентки с продолженным ростом мультиформной глиобластомы правой теменной доли головного мозга.

Слева - при ПЭТ с  $^{18}\text{F}$ -ФДГ указан неоднородный нечеткий очаг. Справа - при ПЭТ с  $^{82}\text{Rb}$ -хлоридом обнаружен четкий однородный очаг гиперперфузии.

## 2 Реализация мероприятий по развитию ЦКП

- 1) Обеспечение доступа к оборудованию ЦКП для выполнения научных и (или) научно-технических проектов по заявкам третьих лиц.

Доступ к оборудованию ЦКП по заявкам третьих лиц «Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины» осуществляется с момента организации данного ЦКП в соответствии с действующими правилами и регламентами эксплуатации ядерно-физических объектов.

- 2) Внедрение упрощенной модели доступа и использования оборудования ЦКП научными и образовательными организациями вне зависимости от их ведомственной принадлежности и формы собственности (подача заявки через сайт, возможность заключения договора через сайт, в том числе на условиях присоединения, дистанционное оказание услуг и выдача результатов)

Доступ к использованию оборудования ЦКП для проведения исследований (с соблюдением всех законодательных актов) открыт для научных и образовательных учреждений вне зависимости от их ведомственной принадлежности и формы собственности.

Процедура доступа и использования оборудования ЦКП «Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины» ИЯИ РАН строго регламентирована действующим законодательством по работе и эксплуатации ядерно-физических объектов и установок. Дистанционное оказание услуг не относится к ЦКП ИЯИ РАН, выдача результатов исследований осуществляется как непосредственно заказчику исследований, так и дистанционным способом.

- 3) Дооснащение приборно-аналитической базы ЦКП современным дорогостоящим научным и (или) метрологическим оборудованием (стоимостью свыше 1 млн. рублей) в объеме не менее 80% стоимости

проекта, в том числе комплектующих, необходимых для сборки и (или) изготовления такого оборудования;

За крайне ограниченное время с момента перечисления финансирования за этап № 1 на счет ИЯИ РАН выполнена большая работа по организации закупок дорогостоящего оборудования для ЦКП ИЯИ РАН – согласованы и утверждены технические задания и планы-графики выполнения работ по оборудованию, оформлены и подписаны договоры с исполнителями на изготовление оборудования.

Так как время изготовления такого уникального оборудования, как правило, составляет порядка года, часть договоров, запланированных на 2-й этап, заключена в 2017 г., на первом этапе, поскольку подготовка, согласование документации и производства для такого оборудования занимает значительное время. Список заключенных договоров на поставки дорогостоящего оборудования представлен в таблице 1. Среди этих договоров необходимо выделить технологически сложные договоры, срок выполнения которых занимает значительное время – это изготовление клистронов для восстановления работоспособности и модернизации ВЧ системы основной части линейного ускорителя ИЯИ РАН до энергии 267 МэВ, изготовление и поставка генераторных ламп типа ГИ-71А с встроенными магниторазрядными насосами с целью обеспечения их применения в качестве модуляторных ламп для обеспечения работы системы ВЧ питания начальной части линейного ускорителя.

В рамках работ по этапу № 1 заключены договоры на поставки комплектующих и вспомогательного оборудования для установок ЦКП ИЯИ РАН (Таблица 2).

Договор	Название	Общая сумма, руб.	Оплачено в 2017 г.
№ П-41130 от 18.12.2017	Клистроны КИУ-40М (2 шт.) для восстановления работоспособности и модернизации ВЧ системы основной части линейного ускорителя ИЯИ РАН до энергии 267 МэВ	15457811,18	
№ 17188.ТК.252.001.ХД.1//227/1421-Д от 19.12.2017	Компрессионный узел	3000000,0	
№ 01-12/17 от 18.12.2017	Поставка оборудования для укомплектования оптического рамановского спектрометра нейтронографической установки «Геркулес»	3327540,0	
№ 171026-АА от 18.12.2017	Поставка оборудования для укомплектования «Оптического рамановского спектрометра «нейтронографической установки «Геркулес»	2137220,0	
№ Т03 от 13.12.2017	Поставка оборудования для Термовакuumного стенда.	6500000,0	
№ ЭВ-2144-2017 от 14.12.2017	Поставка оборудования для модернизации вакуумной системы линейного ускорителя ИЯИ РАН	4146405,44	
№ Н-0143 от 14.12.2017	Поставка комплекта оборудования для модернизации системы питания электромагнитного оборудования ускорителя и каналов транспортировки пучков экспериментального комплекса ИЯИ РАН	16418947,0	
№ 081/18 от 18.12.2017	Изготовление и поставка генераторных ламп типа ГИ-71А в количестве 5 шт. с встроенными магниторазрядными насосами с целью обеспечения их применения в качестве модуляторных ламп для обеспечения работы системы ВЧ питания начальной части линейного ускорителя	11780740,0	
	<b>ИТОГО:</b>	<b>62768663,6</b> <b>2</b>	

**Таблица 2**

Договор	Название	Общая сумма, руб.	Оплачено в 2017 г.
№ 131/С от 19.12.2017	Укомплектование нейтронографической установки «Геркулес»	184500,0	
№ 17-01	Разработка и поставка аппаратно-программного комплекса (АПК) для расчета дозовых распределений в брахитерапии	102550,0	
№ 171204-АФ от 26.12.2017	Поставка кремниевых фотоумножителей MicroFC-30035-SMT в количестве 135 шт.	102550,0	
	<b>Итого:</b>	<b>389600</b>	

#### 4) Существенное расширение перечня оказываемых услуг

За время выполнения работ на этапе № 1 по Соглашению расширен перечень оказываемых услуг за счет появления новых пользователей ЦКП с постановкой новых научно-исследовательских задач. Так например, сформулирована задача, выполнены первые, начальные расчеты и проведена предварительная необходимая работа по созданию радиационно-испытательного стенда на пучке линейного ускорителя ИЯИ РАН.

Расширение перечня оказываемых услуг в ЦКП ИЯИ РАН связано с разработкой и, главное, совершенствованием новых методик исследований на оборудовании ЦКП: линейный ускоритель ионов водорода, нейтронный комплекс, изотопный комплекс и комплекс ядерной медицины. Работа в этом направлении ведется на постоянной основе в сотрудничестве с ведущими научно-исследовательскими российскими и зарубежными научными организациями. Перечень разработанных и постоянно модернизируемых методик приведен в таблице

Перечень уникальных для России методик, разработанных в ЦКП	
1	Методы измерения параметров сильнооточных ускоренных пучков ионов водорода
2	Методы расчета и анализа перспективных ускоряющих структур для ускорителей заряженных частиц нового поколения.
3	Разработка методов и аппаратуры для диагностики и лучевой терапии онкологических заболеваний.
4	Разработка технологий получения перспективных медицинских радиоизотопов для ранней диагностики и лечения онкологических и сердечно-сосудистых заболеваний.
5	Разработка мишеных устройств и мишеней для получения радионуклидов на интенсивных пучках протонов, в частности, мишеней из металлического рублидия, тория, сурьмяносодержащие мишени и др.
6	Разработка генератора рублидия-82 для диагностики кардиологических и онкологических заболеваний с помощью позитронно-эмиссионной томографии, а также его сертификация и клиническое использование как изделие медицинского назначения

Осуществление нормативно-методического, метрологического и информационного обеспечения деятельности ЦКП.

Нормативно-методическое обеспечение

Нормативно-методическое обеспечение деятельности ЦКП ИЯИ РАН осуществляется на постоянной основе руководителем ЦКП и руководителями структурных научных подразделений в составе ЦКП. Это включает в себя своевременное выполнение все обязательных мероприятий обеспечения работы ЦКП – регулярные аттестации рабочих мест персонала, экзамены по технике безопасности, медицинские комиссии. По вновь начинаемым научным задачам формируются временные тематические группы из числа сотрудников ЦКП и организаций–пользователей оборудованием ЦКП, при необходимости привлекаются сотрудники других научных и вспомогательных подразделений Института.

Метрологическое обеспечение

Работы по метрологическому обеспечению оборудования ЦКП проводятся сотрудниками профильных структурных научных подразделений в составе ЦКП, назначенными решением научного руководителя ЦКП. Основными обязанностями ответственных по метрологическому обеспечению является организация мероприятий по выполнению заданной периодичности мониторинга метрологического состояния оборудования. По результатам аудита ответственными за метрологическое обеспечение представляется отчет, в котором основное внимание уделяется методикам измерений, применяемых на оборудовании ЦКП, перечню методик калибровки, по которым осуществляется калибровка измерительного оборудования ЦКП. Отчет обсуждается и утверждается на заседании Научно-технического совета ЦКП, решения НТС являются обязательными для выполнения.



## Информационное обеспечение

Осуществляется на постоянной основе выполнением мероприятий по освещению деятельности и научно-исследовательским возможностям ЦКП в средствах массовой информации, участием в научных мероприятиях всех уровней и регулярном представлением докладов, сообщений на российских и зарубежных конференциях и семинарах.

- 5) Подготовка кадров ЦКП для работы на новом и модернизируемом оборудовании с использованием новых методов и методик.

Осуществляется на постоянной основе реализацией мероприятий, установленных действующим законодательством в части содержания, обеспечения безопасной работы ядерно-физических объектов на территории России.

- б) достижение заданных значений индикаторов и показателей выполнения работ;

На этапе № 1 выполнения работ

№ п/п	Наименование	Единица измерения	Значения на текущий год	
			Запланировано на текущий 2017 год	Достигнуто за отчетный период
1	Число организаций - пользователей оборудованием ЦКП негосударственного сектора, в том числе участников Национальной технологической инициативы, не менее	единиц	5	5
2	Объем привлеченных внебюджетных средств	млн. руб.	10,375	10,500776
3	Отношение фактического времени работы оборудования ЦКП в интересах третьих лиц к фактическому времени работы оборудования ЦКП за год, не менее	%	45	63,5
4	Отношение фактического времени работы оборудования ЦКП к максимально возможному времени работы оборудования ЦКП за год, не менее	%	75	75,4

5	Доля исследователей в возрасте до 39 лет в общей численности исследователей, выполняющих работы с использованием оборудования ЦКП, не менее	%	40	46,8
6	Количество разработанных (освоенных) новых методик измерений, не менее	единиц	2	2
7	Удельный вес лабораторного и аналитического оборудования в возрасте до 5 лет в общей стоимости лабораторного и аналитического оборудования ЦКП, не менее	%	65	67,5
8	Число организаций - пользователей оборудованием ЦКП, не менее	единиц	15	15
9	Количество публикаций в российских и иностранных научных журналах, индексируемых в базе данных Web of Science или Scopus, в которых имеется ссылка на выполнение работы с использованием оборудования ЦКП, не менее	единиц	10	10
10	Количество результатов интеллектуальной деятельности, полученных с использованием оборудования центра, в отношении которых подана заявка на получение правовой охраны в Российской Федерации и (или) за рубежом, не менее	единиц	0	0

7) Выполнение работ и оказание услуг для проведения научных исследований, а также осуществления экспериментальных разработок, в том числе в интересах третьих лиц.

Выполняется на постоянной основе заключением договоров на выполнение конкретных научно-исследовательских задач, договоров о научно-техническом сотрудничестве, связанном с решением длительных перспективных научных и технологических задач.

8) Реализация комплекса мероприятий, направленных на обеспечение максимальной загрузки оборудования ЦКП и привлечение третьих лиц (в соответствии с приказом Минобрнауки России от 27 октября 2011 г № 2561).

Решение этой задачи в основном связано с оснащением ЦКП новым современным оборудованием, проведением научно-исследовательской работы по повышению надежности работы технологических систем ЦКП, развитием и совершенствованием новых методик проведения НИОКР.

- 9) Обеспечение загрузки в интересах внешних внерегиональных пользователей на уровне не менее 20 %.

Выполняется развитием сотрудничества с внерегиональными пользователями – российскими и зарубежными университетами, национальными лабораториями и научно-исследовательскими организациями

- 10) Обеспечение двукратного роста числа публикаций в российских и зарубежных журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и (или) Scopus, а также иных охраняемых результатов интеллектуальной деятельности, полученных с использованием оборудования ЦКП.

Проведена необходима предварительная работа для выполнения этой задачи.

## Заключение

В результате выполненных работ на этапе № 1 получены следующие результаты:

1. В результате проведенных работ по ВЧ системе основной части ускорителя, ВЧ каналы № 3-10, 3-11, 4-1 имеют следующие основные выходные параметры:

- длительность в/в импульса модуляторов – не менее 220 мкс.;
- неравномерность модулирующего импульса – не более  $\pm 1,5\%$ ;
- длительность импульса огибающей ВЧ поля в резонаторах – не менее 190 мкс.;
- стабильность ВЧ поля в ускоряющих резонаторах с включенными обратными связями по фазе и амплитуде системы АРФА – не более 1%;
- стабильность температуры ускоряющих резонаторов, обеспечиваемая системой АРЧТ – не более  $1^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, были достигнуты проектные уровни ВЧ полей в резонаторах при работе ВЧ каналов на частоте повторения импульсов запуска 50 Гц при длительности ВЧ импульсов не менее 190 мкс. Системы АРЧТ и АРФА обеспечивают необходимую для ускорения пучка протонов стабилизацию собственных частот резонаторов, а также амплитуд и фаз полей в резонаторах.

**Вывод:** Оборудование ВЧ каналов № 3-10, 3-11, 4-1 готово к эксплуатации в составе линейного ускорителя при работе в сеансах по ускорению пучка протонов в диапазоне энергий от 209 до 267 МэВ.

2. Анализ результатов многолетней эксплуатации ламп ГИ-71А и ГМИ-44А, начиная с 2008 года, показывает, что тандем этих ламп позволял (с помощью системы ПРИЗ) успешно тренировать лампу ГИ-71А в выходном ВЧ каскаде, работающим в штатном режиме. В свою очередь при переходе на лампу ГИ-71АМ имеют место существенные различия, определяющие характер поведения тандема ламп ГИ-71А и ГИ-71АМ:

Лампы ГИ-71А изготавливаются поштучно – 1-2 лампы в год. При таком количестве ламп трудно поддерживать требуемое качество технологических процессов. Действительно, неоднократно имели место случаи выхода из строя ламп после нескольких сотен часов эксплуатации в составе выходных ВЧ каскадов при максимальной наработке 8-9 тыс. часов.

В лампе ГИ-71АМ не предусмотрена установка магнито-разрядных насосов.

Сеточные токи в лампе ГИ-71АМ составляют 30-40А, что существенно превышает уровень сеточных токов лампы ГМИ-44А.

В связи со сложившейся ситуацией принято решение разработать модификацию лампы ГИ-71А специально для модулятора с установкой магнито-разрядных насосов на сеточном электроде. Техническое задание разработано и согласовано с предприятием-изготовителем, заключен договор, Срок исполнения – 2018 год.

3. Автоматизированная система перемещения детектора установки «Горизонт» предназначена для позиционирования детектора нейтронов в вертикальной плоскости рассеяния для регистрации отраженных образцом нейтронов в рефлектометрических экспериментах. В настоящее время перемещение детектора — единственная операция, во время измерений выполняемая вручную. Оснащение нейтронного рефлектометра-малоуглового спектрометра «Горизонт» данной системой позволит полностью автоматизировать процесс.

Оснащение установки «Горизонт» автоматизированной системой перемещения детектора позволит упростить и ускорить процесс позиционирования детектора и осуществлять управление установкой полностью дистанционно, что позволит сократить время нахождения персонала в зоне с повышенным радиационным фоном и более эффективно использовать пучковое время.

4. Целью исследований и работ по модернизации протонной лучевой установки Комплекса протонной терапии (КПТ) ИЯИ РАН, проведенных в 2017 году было:

- Обеспечение качества формирования пучка с помощью системы двойного рассеяния для протонов с энергией 127-209 МэВ в новых условиях управления медицинским каналом Мезонной фабрики ИЯИ РАН.

- Модернизация позиционера пациента с целью повышения точности и надежности позиционирования пациента при облучении.

- Методические работы по обеспечению контроля формирования медицинского пучка протонов на основе системы двойного рассеивания при контроле параметров пучка с помощью водного фантома «PTW T41029» с программным обеспечением «Mephysto mc<sup>2</sup>».

- Разработка и изготовление новых устройств для обеспечения формирования индивидуальных терапевтических пучков (юстирующие устройства, устройства управления затворами, модуляторы энергии и др.).

- Обеспечение точности модуляции энергии с помощью гребенчатых фильтров с модуляциями модифицированного пика Брэгга в диапазоне 25-50мм, рассчитанных по разработанной программе FilterCalc с симуляцией пробега протонов в веществе по программе SRNA, использующей алгоритмы метода Монте-Карло.

Все разработанное и установленное в 2017 году оборудование показало свою работоспособность и соответствует техническим требованиям. Проведенные испытания вновь установленного оборудования КПТ позволили сделать следующие выводы.

- Время, необходимое на измерения всех параметров пучка протонов при энергии 209МэВ и 160 МэВ составляет ~ 1час 10мин. Точность измерений пучков соответствует заложенным требованиям.

- Подтверждена сильная зависимость формы (плато) глубинных дозовых распределений (пика Брэгга) от угла падения протонов на гребенки фильтра. Это

подтвердило важность установленных устройств для тонкой настройки положения индивидуальных формирующих устройств.

- Подтверждена сильная зависимость формы (плато) глубинных распределений от параллельности траекторий падающих протонов. Крайне важна строгая коллимация пучка на входе и выходе защиты, а также перед гребенчатым фильтром.
- Устройства юстировки вторичного рассеивателя прекрасно показали себя в работе, существенно ускорив и упростив процедуру настройки положения рассеивателя.
- При расчете гребенчатых фильтров следует применять одну (эффективную) энергию протонов поскольку форма плато сохраняется при переходе на другую энергию, а меняется только интервал пробегов в соответствии с энергией протонов.

Эти результаты будут использованы при подготовке и проведении доклинических и клинических испытаний протонной лучевой установки КПТ ИЯИ РАН.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Gavrilov S., Feschenko A., D. Chermoshentsev D. Bunch Shape Monitors for modern ion linacs// Journal of Instrumentation. 017P 1117,11 December, 2017
- 2 Belov A.,Gavrilov S.,Frolov o.,Netchaeva L., Nikulin E.,Zubets V. High sensitivity ion energy analyzer // Journal of Instrumentation. JINST\_056P\_1217
- 3 Парамонов В., Кравчук Л., Рыбаков И. Ввод ВЧ мощности в устройство связи ускоряющего резонатора // Письма в ЭЧАЯ, 2017
- 4 Либанова О., Голубева Е., Ермолаев С., Матушко В., Ботвина А. Экспериментальные сечения образования продуктов деления Тория-232 при облучении протонами средних энергий // Письма в ЭЧАЯ, т.15, вып.3, 2018
- 5 Kostenikov N., Zhuikov B.,Chudakov Yu. Application of  $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$  Generetor in Neurooncology // Brain and Behavior, in print, ID BRB3-2017-12-0439
- 6 Ермолаев С., Скасырская А. «Изучение движения генетически связанных радионуклидов  $^{221}\text{Fr}$  и  $^{213}\text{Bi}$  в хроматографической среде» // Радиохимия, в печати (вып.5, 2018)
- 7 Иванова А., Троян И., Чареев Д., Гаврилюк А. Структурные фазовые переходы и уравнение состояния SnTe при высоких давлениях до двух мегабар // Письма в ЖЭТФ т.106, вып.10,с. 637-641, 2017
- 8 Gavriliuk A.,Troyan I., Ivanova A., Aksenov S., Starchikov S. Structural transitions in elemental tin at ultra-high pressures up to 230 GPa // *JETP Letters* **106**(11), 702 (2017)
- 9 Кузнецов С., Литвин В., Марин В. и др. Дифрактометр высокого разрешения на импульсном нейтронном источнике ИН-06 ИЯИ РАН // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. В печати. №5, 2018



- 10 Акулиничев С., Антанович А., Держнев В., Семакина Т., Филоненко В., Чаушанский С. Получение иттербиевой керамики для медицинских радиоактивных источников // Стекло и керамика. (в печати) 2017 .
- 11 Акулиничев С., Гаврилов Ю., Коконцев Д., Яковлев И. Расчет и экспериментальная проверка устройств формирования терапевтических пучков протонов. // Приборы и техника эксперимента. ( в печати)