

Российская академия наук
Отделение физических наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

УДК 621.384.6
№ госрегистрации
01201258485



УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора ИЯИ РАН
доктор технических наук

Л.В.Кравчук

1 октября 2012 г.

О Т Ч Е Т

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«Проведение исследований на линейном ускорителе ИЯИ РАН
с целью получения радиоизотопов для ранней диагностики и терапии
сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний»

Шифр: 2011-1.8-518-004-092

Государственный контракт от 12 мая 2011 г. № 16.518.11.7037

Этап № 4

«Разработка рекомендаций об использовании полученных результатов
в дальнейших исследованиях и разработках»
(заключительный)

Москва 2012 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,
зам. директора ИЯИ РАН
д.т.н.



1 октября 2012 г.

Л.В. Кравчук
(разделы 1-5, введение)

Исполнители темы:

Заведующий отделом,
д.ф.-м.н.



1 октября 2012 г.

А.В.Фещенко
(разделы 2, 3)

Ведущий научный сотрудник
к.т.н.



1 октября 2012 г.

А.С.Белов
(раздел 3)

Главный научный сотрудник,
д.т.н., профессор



1 октября 2012 г.

С.К.Есин
(разделы 1,4)

Главный инженер
ускорителя



1 октября 2012 г.

В.Л.Серов
(разделы 1, 2)

Заведующий лабораторией,
к.т.н.



1 октября 2012 г.

А.И.Кваша
(разделы 3,4)

Заведующий лабораторией,
к.т.н.



1 октября 2012 г.

А.Н.Мирзоян
(разделы 4,5)

Инженер



1 октября 2012 г.

С.А.Гаврилов
(раздел 2,3)

Научный сотрудник



1 октября 2012 г.

С.Е.Брагин
(разделы 1,4)

Старший научный сотрудник
к.т.н.



1 октября 2012 г.



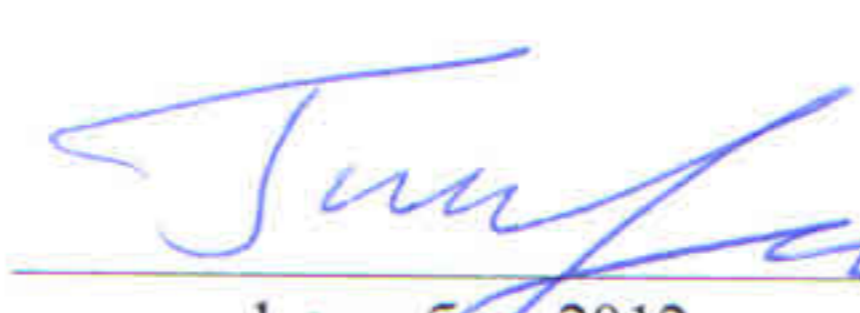



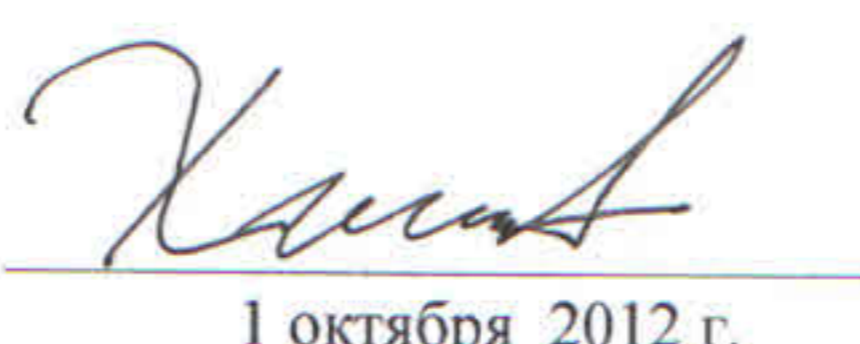


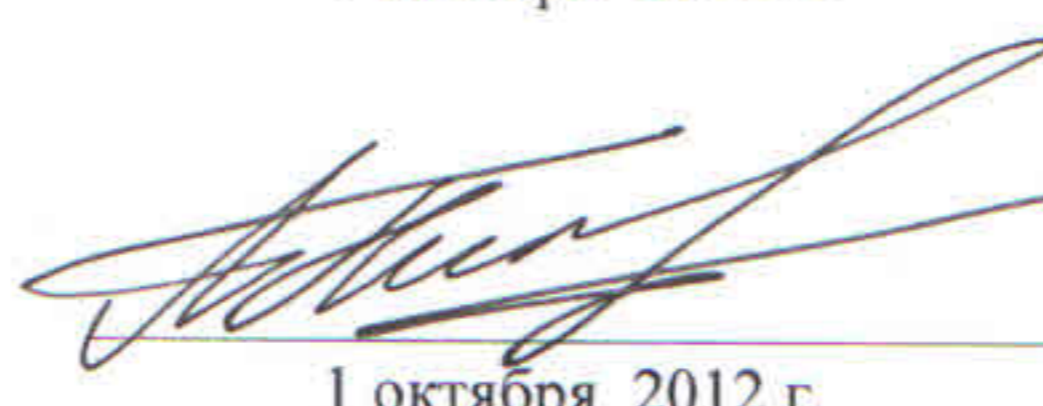
Ю.В.Киселев
(разделы 3)

Ведущий научный сотрудник
д.ф.-м.н.



1 октября 2012 г.

В.В.Парамонов
(раздел 2, заключение)

Младший научный сотрудник	 1 октября 2012 г.	А.Н.Курепин (раздел 2, введение)
Младший научный сотрудник	 1 октября 2012 г.	И.А.Васильев (раздел 4, введение)
Младший научный сотрудник	 1 октября 2012 г.	Д.А.Тлисов (раздел 3, введение)
Заведующий лабораторией д.х.н.	 1 октября 2012 г.	Б.Л.Жуйков (раздел 1,4)
Старший научный сотрудник к.т.н.	 1 октября 2012 г.	С.В.Ермолаев (разделы 1,4)
Заведующий лабораторией к.т.н.	 1 октября 2012 г.	Ю.Ж.Калинин (раздел 3)
Младший научный сотрудник	 1 октября 2012 г.	Д.В.Хлюстин (раздел 2)
Ведущий инженер-электроник	 1 октября 2012 г.	В.А.Шаталов (раздел 1)
Заведующий лабораторией д.ф-м.н.	 1 октября 2012 г.	С.В.Акулиничев (раздел 3)
Нормоконтролер	 1 октября 2012 г.	А.С.Пашеньков

РЕФЕРАТ

Отчет 56 с., 5 ч., 7 рис., 16 источников

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА, СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА, СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА, КАНАЛ ФОРМИРОВАНИЯ ИНЖЕКТОРНОГО КОМПЛЕКСА, МИШЕННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗОТОПНОГО КОМПЛЕКСА

Объектами исследования в данной работе являются основные системы сильноточного линейного ускорителя ионов водорода Института ядерных исследований РАН – высокочастотная система и система измерения параметров пучка, системы формирования пучка и обеспечения безопасности изотопного комплекса, аппаратура ВЧ системы ускорителя – генераторные лампы и электроника управления режимами работы ламп.

Целью данной работы является проведение исследований на линейном ускорителе протонов ИЯИ РАН с целью получения радиоизотопов для ранней диагностики и терапии сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний разработка новых решений управления и стабилизации системой высокочастотного питания ускорителя, системы диагностики пучка, управления, блокировки и сигнализации мишенных узлов Изотопного комплекса ИЯИ РАН, АСУ и разработка методов и систем прецизионного формирования и измерения параметров протонного пучка на мишени радиоизотопного комплекса.

Поставленная задача решается в рабочих сеансах ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН, основная цель которых - отработка режимов работы ускорителя и параметров пучка при работе на радиоизотопный комплекс ИЯИ РАН, анализ полученных экспериментальных данных. Важной составляющей этого комплекса работ является проведение комплексных исследований на специальных измерительных стендах, в первую очередь, измерения и испытания мощных СВЧ приборов системы высокочастотного питания, стендовые измерения приборов диагностики пучка до их окончательной установки на ускоряющий канал и каналы транспортировки пучка.

Анализ и практическая реализация существующих экспериментальных методов постановки экспериментов на радиоизотопном комплексе и формирование перечня требований и характеристик необходимого специального оборудования, полученной в рабочих сеансах экспериментальной информации позволят повысить качество, надежность и безопасность работы ускорителя, а также оптимизировать режимы работы (параметры и стабильность ускоренного пучка протонов, условия работы мишенного комплекса – мишени, вспомогательные системы) при наработке перспективных медицинских изотопов. В этой комплексной задаче самым важным является обеспечение бесперебойной и стабильной работы системы высокочастотного питания ускорителя как основного источника нарушений в работе ускорителя, системы формирования параметров пучка, особенно на участке инжекторного комплекса и на участке вывода пучка с энергией 160 МэВ. Крайне важным является проведение предварительных теоретических исследований с помощью специализированных пакетов программ – это не только снижает стоимость реализации разработанных методик, но и дает возможность оптимизировать рабочие характеристики в данной конкретной методике.

Проведенные исследования режимов работы ускорителя и систем Изотопного комплекса, разработанные методы в рамках данной НИР являются универсальными в данной области методиками. Они могут быть использованы на всех ускорителях заряженных частиц, в каналах транспортировки пучков, особенно при работе на специализированные комплексы (изотопы, ядерная лучевая терапия). Разработанные в данном конкретном случае системы прецизионного формирования протонного пучка с энергией 160 МэВ на мишень изотопного комплекса и комплекса протонной терапии могут найти практическое применение на аналогичных ядерно-физических установках для фундаментальных и прикладных исследований, а также на ядерно-энергетических установках при решении задач обеспечения радиационной безопасности.

По результатам выполненного цикла работ по модернизации оборудования системы высокочастотного питания ускорителя, системы измерения параметров

пучка и канала транспортировки инжекторного комплекса сформированы соответствующие методики, которые могут найти применение на всех ускорителях заряженных частиц.

Получение радионуклидов и на их основе радиофармпрепаратов сопровождается, особенно в последние годы, интенсивными разработками оборудования, позволяющего автоматизировать постановку и съем мишеней, процесс облучения, обработку облученных материалов, получение конечной продукции и контроль их качества. Такое оборудование, создаваемое на основе современной электроники и вычислительной техники при соответствующем уровне разработки программного обеспечения, организует как дистанционное управление всем процессом получения радионуклидов, так и полный контроль отдельных операций, что принципиально важно для сохранения устойчивого и безопасного режима работы с высокоактивными материалами. Особо важную роль играет автоматизация данных процессов при получении ультракороткоживущих изотопов.

Содержание

	Введение.....	8
1	Результаты работ по государственному контракту на предыдущих этапах НИР (№ 1 - № 3).....	11
2	Проведение экспериментальных исследований и анализ информации по условиям работы и надежности модернизированных систем высокочастотного питания и систем измерения пучка.....	27
3	Разработка программ проведения дальнейших исследований, обоснование их использования	42
4	Обобщение, оценка результатов выполненной НИР и возможности их применения.....	47
5	Проведение оценки рыночного потенциала полученных результатов.....	49
	Заключение.....	53
	Список использованных источников.....	55

Введение

Научно-исследовательские работы по государственному контракту от 12 мая 2011 г. № 16.518.11.7037 - «Проведение исследований на линейном ускорителе ИЯИ РАН с целью получения радиоизотопов для ранней диагностики и терапии сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний» - требует обеспечения стабильности параметров пучка в течение всего сеанса облучения мишени с одновременным обеспечением прецизионных параметров ускоренного пучка протонов линейного ускорителя как по энергии и току пучка, так и по продольным и поперечным параметрам пучка. Это, в свою очередь, приводит к необходимости оснащения основных систем ускорителя современной элементной базой электронных систем управления, измерения параметров пучка, блокировки и сигнализации.

За последние два десятилетия использование радиоактивных изотопов и меченных ими соединений, специально синтезируемых для медико-биологических исследований [1-7], получило широкое распространение, обусловленное как ростом числа и постоянным усовершенствованием ускорителей заряженных частиц, так и развитием техники детектирования распределения радионуклидов и их соединений в организме человека. В различных ядерных центрах, имеющих ускорительные комплексы, разработаны программы получения радионуклидов, основанные на результатах длительных исследований применительно к технологическим возможностям данной конкретной лаборатории [8-11].

Линейный ускоритель мезонной фабрики является уникальной электрофизической установкой. Его основные параметры – энергия ускоренного пучка ионов водорода, ток пучка, система промежуточного вывода пучка обеспечивают производство практически всего спектра «ускорительных» медицинских радиоизотопов для ранней диагностики и терапии сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний. Имеющиеся системы стабилизации и контроля параметров пучка, АСУ обеспечивают эффективную работу Экспериментального комплекса, изотопного Комплекса, Комплекса протонной терапии ИЯИ РАН.

Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН_предназначен для получения высокоинтенсивных пучков протонов и отрицательных ионов водорода со средним суммарным током ионов обоих знаков заряда 0,5 мА при энергии 600 МэВ и генерации высокоинтенсивных пучков вторичных частиц: мюонов, пи-мезонов, нейтрино, нейтронов и нейтральных атомов водорода. Длительность макроимпульса пучка 100 мкс при частоте повторения 100 Гц. Основная часть ускорителя на энергию 600 МэВ (длина 360 м) состоит из 27 резонаторов с проводящими шайбами и диафрагмами с ВЧ питанием на частоте 991 МГц от клистронных генераторов с импульсной мощностью 4,75 МВт. Предусмотрен промежуточный вывод пучка с энергией до 160 МэВ для прикладных работ (медицинские радиоизотопы, радиационные испытания и материаловедение). Фокусировка пучка обеспечивается квадрупольными линзами трубок дрейфа начальной части ускорителя и квадрупольными дублетами между ускоряющими секциями основной части ускорителя. Автоматизированное управление ускорителя обеспечивается пятью секторными ЭВМ и шестью ЭВМ центрального пульта. Предусмотрена возможность увеличения среднего тока ускорителя до 1,0 -2,0 мА.

В настоящее время в мире существуют три ускорителя класса мезонных фабрик: линейный ускоритель ионов водорода Лос-Аламоской мезонной фабрики (США) на энергию 800 МэВ и ток 1000 мкА, линейный ускоритель нейтронного комплекса, Оак-Ридж, США и циклотрон ТРИУМФ для ускорения отрицательных ионов водорода на энергию 520 МэВ и средний ток 250 мкА в Ванкувере (Канада).

Главные направления научных исследований на пучках линейного ускорителя Московской мезонной фабрики:

- фундаментальные исследования редких процессов в области физики атомного ядра и элементарных частиц с помощью высокоинтенсивных пучков вторичных частиц;
- исследования в области физики нейтронов на базе мощных импульсных источников в широком диапазоне энергий;

- исследования в области физики и техники высокоинтенсивных ускорителей заряженных частиц;
- прикладные исследования [2] в области физики твердого тела, трансмутации радиоактивных отходов, материаловедения, радиохимии, биологии;
- использование пучков протонов, нейтронов и пи-мезонов для терапии рака, медицинской диагностики и производства изотопов, не получаемых на других установках;
- неразрушающий экспресс-анализ материалов и конструкций, элементный и изотопный анализ.

1 Результаты работ по государственному контракту на предыдущих этапах НИР (№ 1 - № 3)

На этапе № 1 выполнения НИР по государственному контракту по результатам проведенного аналитического обзора современной научно-технической, нормативной и методической литературы в области ядерной медицины можно сделать следующие выводы.

Преимущества, а в ряде случаев и незаменимость методов ядерной медицины обусловили на протяжении нескольких последних десятилетий её устойчивое развитие и превращение в неотъемлемую часть клинической практики в развитых странах.

Мировое производство и потребление радиофармацевтических препаратов растет ежегодно на 10-15%. На нужды ядерной медицины расходуется более 50% годового производства радионуклидов во всем мире. Только в США с использованием радионуклидов ежегодно производится около 13 млн. диагностических процедур и примерно 100 млн. лабораторных тестов, применяется около 50 тысяч терапевтических доз, в области ядерной медицины практикуют более 30 тысяч специалистов. Объем рынка радиоизотопной медицинской продукции к 2020 году оценивается в 20 млрд. долларов.

Современное развитие мировой ядерной медицины характеризуется следующими особенностями:

- увеличением объема выпуска радионуклидной продукции медицинского назначения (так за последнее десятилетие ежегодный прирост продукции составлял до 15%);
- возрастающим числом потребителей (в мире функционируют более 100 специализированных ядерных медицинских комплексов; в ближайшие годы ожидается увеличение их числа в 2 раза);
- опережающим ростом потребления радионуклидной продукции терапевтического назначения;
- расширением областей приложений диагностических тестов;

– повышением требований к технологиям получения радионуклидов (экономическая рентабельность, экологическая и радиационная безопасность).

Разработаны следующие экспериментальные методики для УСУ «Линейный ускоритель ионов водорода и импульсный источник нейтронов ИЯИ РАН»:

- Методика проведения измерений параметров первичного пучка протонов ускорителя.
- Методика проведения сеанса облучения мишеней радиоизотопов.
- Методика формирования пучка и контроля его параметров Комплекса протонной терапии.

Разработанные методики дают возможность проводить весь комплекс планируемых и перспективных исследований как в рамках задач Изотопного комплекса ИЯИ РАН, так и в рамках Программы фундаментальных и прикладных исследований на линейном ускорителе ИЯИ РАН с привлечением широкого круга пользователей из других организаций и ведомств России.

Программа развития УСУ. Работа по развитию УСУ, оптимизация режимов работы ускорителя на Изотопный комплекс и комплекс протонной терапии, разработка новых элементов оборудования ускорителя, повышение надежности и безопасности работы проводится на постоянной основе в рамках утверждаемых программ развития УСУ. Основными задачами в разработанной Программе развития УСУ являются совершенствование материально-технической базы установки, замена морально и физически устаревшего оборудования на современные приборы и устройства, основанных на новых базовых элементах, повышение надежности и безопасности работы всего ядерно-физического комплекса.

Затраты на реализацию задач Программы развития УСУ могут быть существенно уменьшены предварительными теоретическими расчетами и оценкой условий работы, предлагаемых методов решений, расчетами режимов работы основных систем ускорителя. В рамках решения этих задач, в частности, проведены теоретические расчеты радиационных условий на современном пакете программ SHIELD, в том числе анализ скорости появления радиационных повреждений в датчиках системы измерения параметров пучка и оптимальной конфигурации за-

щиты от излучений. Полученная расчетная информация практически реализована для соответствующих систем Комплекса протонной терапии ИЯИ РАН.

На этапе № 2 НИР по государственному контракту выполнен запланированный цикл работ по экспериментальному исследованию систем высокочастотного питания и системы измерения параметров пучка. В рабочих сеансах 2011 года:

- проведена экспериментальная проверка установки и коррекции поперечного положения пучка в ускоряющих резонаторах линейного ускорителя;
- проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния погрешностей установки уровня фокусирующих полей в магнитных элементах фокусирующей системы на размеры и форму сгустков ускоренного пучка на участках ускорителя с энергией 100 МэВ и 160 МэВ. Оптимум настройки устанавливается по минимуму потерь частиц в процессе ускорения.

Выполнены детальные исследования условий работы одной из самых проблемных систем ВЧ питания ускорителя - мощных анодных модуляторов системы ВЧ питания начальной части (НЧУ) ускорителя ИЯИ РАН. Модуляторы обеспечивают импульсное анодное питание выходных ВЧ каскадов шести каналов усиления с амплитудой импульсов 15-20 кВ, током 150-250 А при длительности импульсов 300-400 мкс и частоте повторения 50-100 Гц. Проведены исследования, выполнен комплекс измерений режимов работы всех элементов модуляторной системы. Показано, что в существующих условиях (наличие ненадежных высоковольтных узлов, высокого уровня импульсных помех, размещение оборудования в зданиях, удаленных друг от друга на десятки метров, крайне сложно обеспечить надежную работу системы. Последовательная реализация намеченных мероприятий и анализ полученной экспериментальной информации позволит существенно повысить надежность работы модуляторной системы.

Для измерения параметров пучка ускоренных протонов на выходе линейного ускорителя ИЯИ РАН используется ионизационный монитор поперечного сечения (ИМПС) на остаточном газе, в состав которого входит ТВ-камера с ПЗС-матрицей. Взаимодействие ореола ускоренного пучка с элементами вакуумной камеры ускорителя приводит к возникновению потока нейтронов, вызывающих повреждения в

цифровой электронике ИМПС. Для устранения данных проблем был разработан и установлен на ускорителе зеркально-линзовый тракт (ЗЛТ).

Оценка возможных радиационных повреждений была проведена при помощи адронного транспортного кода SHIELD. Транспортный код SHIELD предназначен для Монте-Карло моделирования взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями и используется для решения того же класса задач, что и программы Geant4, Fluka, MCNPX, RHITS. SHIELD моделирует перенос нейтронов с энергией $E_n < 14.5$ МэВ на основе 28-групповой системы нейтронных констант. Полученные результаты расчетов легли в основу создания радиационной защиты электроники ИМПС.

Перевод на современную электронную компонентную базу систем АСУ и измерения параметров пучка.

Разработаны программы записи и чтения информации, а также пакеты тестового и рабочего программного обеспечения АСУ ЛУ. Исследование скоростей обмена с УСО при использовании указанных выше программ показало, что частота процессора ЭВМ, используемого для управления, должна быть не менее 600 МГц. Первые разработанные рабочие программы показали преимущество используемого графического интерфейса для управления ускорителем.

В лаборатории автоматизации ИЯИ РАН завершена работа по разработке структурной схемы 100 МВ локальной сети (Fast Ethernet) АСУ ЛУ – радиоизотопный комплекс - медицинский комплекс - экспериментальный комплекс ММФ, в рамках которой составлена спецификация оборудования для создания локальной сети АСУ ММФ.

Продолжается работа по созданию базы данных, разработке комплекса прикладных программ, обеспечивающих контроль и управление оборудованием линейного ускорителя и системой измерения параметров пучка.

Проведен комплекс работ по оптимизации взаимодействия программ пошагового управления и опроса всех без исключения сигналов, контроля ВЧ системы, восстановления состояния ВЧ системы после единичных сбоев, анализа аварий, управления фокусирующей системой, измерения потерь пучка, измерения токов пучка и профиля пучка, восстановления эмиттанса пучка и коррекции пучка.

Проведение работ по модернизации УСУ.

Одним из основных методов повышения надежности работы линейного ускорителя является увеличение длительности ВЧ импульса и, соответственно, длительности импульса тока пучка. Решение этой сложной комплексной задачи связано с модернизацией практически всех технологических систем ускорителя. Проектная длительность импульса тока пучка линейного ускорителя ММФ составляет 100 мкс. За прошедшее время выполнен комплекс работ по увеличению длительности импульса тока пучка инжектора, импульса каналов ВЧ питания начальной части ускорителя.

Завершены работы по увеличению длительности импульсов на ВЧ каналах основной части ЛУ на участке энергии пучка до 160 МэВ. В рамках этой работы разработана, испытана и налажена система формирования опорного ВЧ импульса для высокостабильной линии опорной фазы основной части ускорителя на частоте 991 МГц.

Для увеличения длительности импульса тока пучка в основной части ускорителя (участок линейного ускорителя с энергией пучка до 209 МэВ) на основе анализа предельных возможностей существующей системы ВЧ питания:

- выполнена настройка всех элементов ВЧ системы, позволившая получить равномерность вершины импульса не хуже нескольких процентов.
- проведена доработка системы стабилизации фазы и амплитуды, позволяющая работать с удлиненными ВЧ импульсами. В результате проведенных работ длительность импульсов ускоряющего поля на участке до 160 МэВ увеличена до 200 мкс, что позволило перейти к ускорению пучка длительностью 180 мкс.

В последующих сеансах проведены испытания клистронов КИУ-40 и КИУ-40М ускоряющей системы основной части ускорителя, а также системы авторегулирования собственной частоты резонаторов при увеличенной длительности ВЧ импульсов. Энергия в импульсе при этом увеличилась примерно в 1.8 раза.

Продолжаются работы по защите каналов усиления ВЧ мощности в части увеличения их быстродействия и помехозащищенности. Новая аппаратура резервных каналов начальной и основной частей разработана таким образом, чтобы

при переводе резонатора на резервный канал амплитудно-фазовые характеристики параметров поля воспроизводились с высокой точностью.

Разработана, внедрена и находится в режиме эксплуатации схема стабилизации мощного задающего устройства, обеспечивающая стабильность фазовых соотношений между ВЧ полями в резонаторах начальной и основной частей ускорителя с новой схемой предварительных усилителей основной части, позволившей сократить число каскадов и снизить перенапряжения, а также защитой клистронов основной части ускорителя при снижении уровня масла в катодном узле.

Проведена доработка с учетом опыта эксплуатации схемы двукратного повторного автоматического включения любого из каналов системы высокочастотного питания ускорителя для уменьшения числа отключений каналов при одиночных пробоях, благодаря которой не происходит заметной тепловой расстройки резонатора и потери времени на восстановление номинального ускоряющего поля в нем.

Проведение работ по закупке оборудования.

В рамках совершенствования и модернизации материально-технической базы УСУ выполнены закупки специального и вспомогательного оборудования для ускорителя ИЯИ РАН. Основную часть затрат в этой статье расходов составляют закупки ламп системы ВЧ питания для начальной и основной частей ускорителя.

За время выполнения всех запланированных работ по государственному контракту суммарные расходы на закупку генераторных ламп составили примерно 1,35 млн.рублей, при этом необходимо отметить, что заметную часть расходов составляют и оперативные закупки электроники, комплектующих и приборов для систем АСУ, измерения параметров пучка, УБС, расходных материалов. Общие прямые затраты по статье «Закупка оборудования» можно оценить примерно в 1,8 млн. рублей, что составляет около 30% финансирования государственного контракта.

На этапе № 3 выполнения НИР по государственному контракту проведен комплекс работ по исследованию характеристик пучка при работе на изотопный комплекс.

Для производства широкого спектра ускорительных радиоизотопов необходимо изменять энергию пучка от 100 до 160 МэВ и его интенсивность в диапазоне

от 1 до 120 мкА среднего тока. При этом средняя мощность пучка достигает 19 кВт. От размеров пучка и его сходимости зависят как эффективность наработки изотопов, так и предотвращение возможности повреждения и разрушения мишени в процессе ее облучения высокоинтенсивным пучком. Поэтому формирование заданных параметров пучка на мишени и их контроль являются крайне важными задачами.

Конкретные значения этих параметров пучка определяются режимами работы всех предшествующих частей ускорителя – инжекторным комплексом, начальной частью ускорителя (100 МэВ) и участком ускорения пучка до энергии 160 МэВ.

По результатам проведенных измерений и расчетов магнитной оптики канала инжекции и параметров пучка можно сделать следующие выводы:

- расчеты, выполненные по измерениям на прямом участке ускорителя до поворотного магнита, удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными на участке инжекторного комплекса (ИК) и расчетами по ним;
- большее совпадение результатов происходит при меньших значениях дисперсии в исследуемой точке на участке ИК;
- существующий в настоящее время режим питания линз дублета Д2-ИК позволяет уменьшить на 25% горизонтальный среднеквадратичный размер пучка на изотопной мишени.

Разработан пакет программ, позволяющий по результатам обработки экспериментальных данных проводить оценку характерных параметров пучка на мишени изотопного комплекса ИЯИ РАН. Полученные результаты позволяют формировать пучок на радиоизотопных мишенях в широком диапазоне энергий и начальных параметров пучка, а также достаточно оперативно оценивать размеры пучка на мишени и проводить при необходимости их коррекцию. Показано, что отдельное питание линз дублета Д2-ИК расширяет возможности формирования пучка на мишени.

Проведены рабочие сеансы ускорителя, экспериментальные исследования, анализ полученных результатов по условиям работы мишенного узла и системы формирования пучка Изотопного комплекса.

В рабочих сеансах 2012 года:

- проведена экспериментальная проверка установки и коррекции амплитуд и фаз полей в ускоряющих резонаторах линейного ускорителя;
- проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния погрешностей установки фаз полей в ускоряющих резонаторах на размеры и форму сгустков ускоренного пучка на участках ускорителя с энергией 100 МэВ и 160 МэВ. Оптимальная фазировка резонаторов в данном случае является одним из наиболее сильнодействующих факторов на качество пучка и уровень потерь. Оптимум настройки находился по минимуму частиц в продольном ореоле пучка;
- система измерения параметров пучка – проведено исследование поперечного движения и процедуры коррекции пучка на выходе ускорителя (регулярный цикл работ). Когерентные смещения пучка, достигающие 6-8 мм, обусловлены действием погрешностей геодезической юстировки фокусирующих элементов и их статистическим накоплением по длине ускорителя. Смещения пучка в поперечной плоскости соответствуют оценкам, полученным методом математического моделирования динамики пучка на этапе проектирования ускорителя. Наличие таких смещений пучка требует коррекции положения пучка по длине ускорителя.

По результатам экспериментальных исследований сформирована и реализована программа работ по подготовке аппаратуры, методик и программного обеспечения процедуры коррекции, проведена оптимизация фокусирующей системы с целью снижения уровня потерь пучка.

Разработан комплекс предложений по повышению надежности конструкции генератора медицинских радиоизотопов.

Генератор радиоактивных изотопов - общее название установок, в которых из долгоживущего радиоактивного изотопа образуется другой, с меньшим периодом полураспада. Этот генератор используются для получения радиоактивных препаратов, применяемых с диагностической или лечебной целью.

Генератор стронций/рубидий-82

Принцип действия разработанного нами медицинского генератора основан на ионном обмене и не связан с высокотемпературными методами. Однако наработка ра-

дионуклида на ускорителе, его выделение и изготовление генератора являются взаимосвязанными стадиями получения одного продукта.

Принцип действия генератора

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) является современным средством медицинской диагностики, причем одним из наиболее эффективных средств. Радионуклиды, используемые в ПЭТ, введенные в организм человека в той или иной химической форме, распадаются с испусканием позитронов. Позитрон аннигилирует с электроном, что дает два гамма-кванта с энергией 511 кэВ каждый, которые могут быть зарегистрированы в режиме совпадения детекторами в позитронно-эмиссионном томографе. В результате, с высоким пространственным и временным разрешением детектируется местоположение и концентрация радионуклида, а по поведению химического соединения, содержащего радионуклид, можно судить о процессах, происходящих внутри организма. В настоящее время наибольшую роль имеет ^{18}F (вводимый, в первую очередь, в виде фтордиоксиглюкозы), а также ^{15}O , ^{11}C и ^{13}N . Все эти радионуклиды имеют очень короткие периоды полураспада и поэтому производятся на циклотроне в самой клинике или, по крайней мере, вблизи клиники.

Генератор Sr/Rb-82 обеспечивает получение короткоживущего рубидия-82 (75 секунд) из материнского радионуклида стронция-82 (25,3 дня). Рубидий-82 распадается с испусканием позитрона. Рубидий, аналог калия, поступающий в виде хлорида, служит для диагностики кровотока во всей кровеносной системе, и в первую очередь, в кардиологии. И исходный радионуклид стронций-82, и сам генератор можно производить вдали от клиники и транспортировать на любые расстояния в компактном контейнере. Кроме того, перспективно использовать рубидий-82 в комбинации с УКЖ-радионуклидами, производимыми на циклотроне.

Исследования генераторной системы Sr/Rb, в которой стронций остается на колонке, а рубидий вымывается, проводились давно многими исследователями. В ходе этих исследований было показано, что для генераторной колонки можно использовать различные сорбционные материалы, однако наиболее практичным является использование гидратированного оксида олова в α -форме. В этом случае

рубидий может вымываться с колонки физиологическим раствором (0,9% NaCl) и непосредственно вводиться в кровеносную систему пациента. Чрезвычайно существенным является оптимальная конструкция генератора. Используемый в настоящее время американский генератор Cardiogen выполнен в виде таблетки, заключенной в пластиковую оболочку. Такой генератор эксплуатируется в течение 28 дней, причем за это время через него пропускают всего не более 5 л раствора, а после этого генератор отправляют на регенерацию стронция-82. Наша конструкция генератора представляется более перспективной.

Конструкция генератора

Общей особенностью нашей конструкции является то, что корпус колонки изготовлен в основном из стандартных компонентов Swagelok (нержавеющая сталь), выпускаемых серийно. Это делает конструкцию более надежной и дешевой. Генераторная колонка больше по высоте, чем в обычном генераторе, что позволяет пропускать через нее 20 л раствора и эксплуатировать в течение 2-х месяцев, а с двумя дозарядками стронцием-82 – 6 месяцев.

Зарядка генератора

Перед загрузкой в генераторную колонку сорбент активируют следующим образом: выдерживают в физиологическом растворе (0,9% NaCl и pH = 8, устанавливаемый с помощью TRIS-буфера). Затем сорбент помещают внутрь колонки, уплотняют с помощью вибратора и вставляют внутрь вольфрамового контейнера. Нанесение стронция-82 на сорбент осуществляют на установке, основными компонентами которой являются шприцевый насос, шприцевый изолятор, генераторная колонка в контейнере и емкость для стоков. Шприцевый изолятор представляет собой два скрепленных пластиковых шприца и служит для предотвращения попадания стронция-82 на шприцевый насос. Шприцевый насос, управляемый процессором, служит для задания и поддержания скоростного режима элюирования раствора со стронцием-82 через генератор. Величина pH раствора, подаваемого при зарядке генератора, составляет около 7 (нужную величину pH создавали путем добавления буфера трис (гидроксиметил) аминметана - (C₄H₁₁NO₃) к исходному раствору хлорида стронция-82 в 0,1 М HCl. Скорость элюирования составляет 0,7 мл/ч.

После изготовления и зарядки генератора проводится анализ элюата из генератора на содержание в нем ионов тяжелых металлов, на проскок стронция-82 и стронция-85, на наличие эндотоксинов, а также проверяется его стерильность.

Рубидий-82 вымывают изотоническим физиологическим раствором (0,9% NaCl, pH около 7) и вводят внутрь кровеносной системы пациента с расходом от 15 до 80 мл/мин. По важнейшим параметрам – величине «проскока» Sr-82 и 85, концентрации неактивных примесей, допустимого объема пропущенного элюата и т.д. генератор не уступает и даже превосходит зарубежные аналоги.

Использование генератора в ПЭТ

Для использования генераторов с ПЭТ для диагностики пациентов, в первую очередь, необходима специальная инъекционная система, которая обеспечивает точную дозировку ввода раствора, содержащего Rb-82, по объему и активности. При проведении доклинических испытаний с животными такая автоматическая система не является необходимой. В США эксплуатируется система, разработанная фирмой Squibb. В Канаде (Ottawa Heart Hospital) разработана более совершенная система специально для генератора нашего типа для 3D-сканеров. Кроме того, эта система позволяет автоматически регулировать поступление активности в течение одной инъекции, обеспечивая, например, постоянную концентрацию Rb-82 в течение определенного промежутка времени. Это открывает новые возможности для диагностики – наблюдать динамику процессов в сердце.

Генератор данного типа (вариант, разработанный в TRIUMF, Ванкувер) вместе с описанной выше инъекционной системой уже в течение нескольких лет регулярно используется в ПЭТ-исследованиях пациентов в Оттаве. Каждый день диагностику проходят 6 пациентов, причем производительность может быть увеличена. Он эксплуатируется с одной зарядкой в течение 2-х месяцев, при этом активность Sr-82 в генераторе падает от 100 до примерно 20 мКи. После 2-х месяцев эксплуатации он дозарядкается Sr, а еще через 2 месяца - еще раз дозарядкается. Таким образом, один генератор с двумя дозарядками эксплуатируется в течение 6 месяцев.

Для оптимизации процесса получения генераторных радионуклидов важен правильный выбор материала и конструкции мишени. В частности, большую роль играют следующие факторы:

1. Материал должен быть доступен в достаточно больших количествах для обеспечения долговременного производства, так как мишени сравнительно толстые.
2. Основной компонент мишени должен обеспечивать высокий выход образования в ядерных реакциях.
3. Материал мишени должен содержать известное и контролируемое содержание примесей. Особенно важно содержание примесей стабильных природных изотопов того же элемента, что и получаемого радиоактивного изотопа, так как для радионуклидов, получаемых на ускорителе, как правило, очень важна величина удельной активности.
4. Материал должен обладать достаточно высокой теплопроводностью для эксплуатации при высоких токах пучка, что сопровождается большим тепловыделением.
5. В случае твердотельной мишени материал мишени должен обладать высокой температурой плавления.
6. Материал мишени должен обладать низким давлением пара.
7. В случае использования соединения в качестве материала мишени, оно должно обладать высокой теплотой образования и должно быть устойчиво к радиационному разложению.
8. Материал не должен охрупчиваться под действием температурных ударов, так как пучки на многих ускорителях – импульсные.
9. Если используется оболочка мишени, материал оболочки должен быть доступен и технологичен для механической обработки и сварки.
10. Материалы мишени и оболочки не должны обладать высокой токсичностью, что связано с медицинским применением многих из получаемых радионуклидов.
11. Материал мишени или оболочка должны обладать высокой коррозионной устойчивостью к охлаждающей воде, в том числе, при мощном радиоллизе под действием пучка.

12. Материал оболочки и собственно материал мишени не должны сильно взаимодействовать при высоких температурах, возникающих в процессе облучения.
13. Материал мишени (также оболочки) должен легко подвергаться химическому вскрытию для выделения нужного радионуклида (здесь высокотемпературные методы имеют большое преимущество).

Как правило, практически невозможно в полной мере удовлетворить все эти требования одновременно. Требуется компромиссное решение в каждом конкретном случае. Последующая радиохимическая переработка сравнительно массивных мишеней также выдвигает ряд требований:

- а) высокий выход полезного радионуклида;
- б) высокие коэффициенты очистки от неактивного материала мишени;
- в) высокие коэффициенты очистки от радиоизотопов других образовавшихся элементов;
- г) выделение радионуклидов в состоянии «без носителя» (no-carrier-added).
- д) желательно минимальное количество стадий;
- е) экспрессность выделения чрезвычайно важна в ряде случаев, в особенности, для получения короткоживущих радионуклидов.

Здесь использовались различные, в том числе, нестандартные подходы. Рубидий-82 является радиофармацевтическим препаратом для позитрон-эмиссионной томографии, получаемым в генераторе из материнского радионуклида стронция-82. Радионуклид стронция-82 (период полураспада 25 дней) в виде его хлорида находится внутри генератора в генераторной колонке на специальном сорбенте. Изотоп рубидия-82 в виде его хлорида выделяется из генератора путем элюирования через него изотонического раствора хлорида натрия. При этом материнский радионуклид стронций-82 остаётся на сорбенте внутри генератора. Нарботка исходного радионуклида стронций-82 может осуществляться только на уникальных высокоточных ускорителях средних энергий. ИЯИ РАН – единственное место в Европе и Азии, где реально осуществляется наработка стронция-82 в больших количествах. Установка такого типа в ИЯИ РАН – крупнейшая в мире.

Стронций-82 является одним из важных медицинских радионуклидов. Он служит для изготовления генераторов дочернего рубидия-82, применяемых во все более популярном методе медицинской радиодиагностики – позитронно-эмиссионной томографии. Использование этого радионуклида позволяет добиться принципиально иного уровня диагностики всей кровеносной системы ввиду высокого временного и пространственного разрешения. Потребности в стронции-82 далеко не удовлетворены ввиду недостатка высокоточных ускорителей с необходимой энергией протонов.

Ранее основное количество стронция-82 производилось в мире на ускорителях с энергией протонов 500 и 800 МэВ из молибденовой мишени по реакции "spallation". Гораздо более радиоизотопно чистый продукт и с большим выходом получается при облучении рубидия в виде хлорида или бромида и металлического рубидия протонами более низкой энергии (60-100 МэВ) по реакциям $^{85}\text{Rb}(p, 4n)$ и $^{87}\text{Rb}(p, 6n)$.

Эксперименты, проведенные на ускорителях TRIUMF (Ванкувер, Канада) и в ИФВЭ И-100 в Протвино на пучке с интенсивностью до 10 мкА были важны для развития методики и подготовки крупномасштабного получения стронция-82 на отводе пучка 160 МэВ линейного ускорителя Московской мезонной фабрики в Институте ядерных исследований РАН (г. Троицк).

Разработана мишень из металлического рубидия, что позволило отказаться от мишеней хлорида рубидия. Металлическая мишень имеет следующие преимущества по сравнению с хлоридной мишенью. Ранее опубликованные значения выхода стронция-82 с использованием мишеней из хлорида рубидия при малых токах составляют от 0,18 мКи/мкА·ч (исходная энергия 60 МэВ) до 0,429 мКи/мкА·ч (100 МэВ). Из металлического рубидия теоретически должно образовываться всего лишь на 41% больше полезного продукта стронция-82, чем из хлорида. Однако проведенные эксперименты показали, что при токах выше нескольких мкА разница в выходе для мишеней из RbCl и металлического Rb резко возрастает. В случае хлорида количество наработанного стронция-82 увеличивается не пропор-

ционально току, а гораздо слабее, по-видимому, ввиду резкого усиления перегрева и радиолиза в центре мишени, что сопровождается сублимацией RbCl и уменьшением толщины мишени в центре пучка. Этот эффект зависит от формы пучка и ряда других факторов, но выход иногда бывает на 80% ниже расчетного. Снижение выхода создает необходимость при той же наработке значительно увеличивать продолжительность облучения, что дополнительно снижает выход за счет распада во время облучения. Кроме того, коррозионное воздействие хлорида рубидия резко усиливается при повышении тока пучка в следствие роста температуры и усиления радиационного разложения хлорида рубидия с образованием чрезвычайно активного атомарного хлора. Применение вращающегося или сканируемого пучка или вращающейся мишени в значительной мере уменьшает действие вышеописанных факторов, но полностью их не снимает. В случае же металлической рубидиевой мишени имеет место высокая коррозионная устойчивость доступных материалов оболочек (например, нержавеющей стали). Кроме того, гораздо лучшая теплопроводность жидкого металлического рубидия (29,3 ватт/м·град по сравнению с 1,2 ватт/м·град для RbCl) резко снижает вероятность локального перегрева и разгерметизации мишени при высоких токах. Жидкий металлический рубидий (температура плавления 39 °С) может циркулировать внутри оболочки, что намного улучшает теплоотвод.

Металлический рубидий является, конечно, опасным веществом, способным активно реагировать с водой и кислородом воздуха. Как показали специальные опыты, взрывной характер реакция приобретает лишь при одновременном контакте рубидия с водой и воздухом. Однако на воздухе в отсутствие воды и без дополнительного нагревания реакция идет достаточно спокойно ввиду того, что как исходный продукт, так и продукты реакции не становятся газообразными при температурах, возникающих в результате самопроизвольной реакции. В инертном газе (азоте, аргоне, гелии) рубидий медленно окисляется примесями кислорода без воспламенения. Находясь под водой, рубидий также реагирует без взрыва, полностью растворяясь в воде и интенсивно выделяя из нее водород в течение нескольких секунд.

Таким образом, металлическая мишень на самом деле более безопасна, чем хлоридная. При этом в принципе допустимо как газовое (при низкой интенсивности пучка), так и водяное охлаждение мишени. Кроме того, использование металлической рубидиевой мишени допускает использование эффективных высокотемпературных методов выделения, а в случае хлорида рубидия это невозможно или нерационально.

2 Проведение экспериментальных исследований и анализ информации по условиям работы и надежности модернизированных систем высокочастотного питания и систем измерения пучка

Анализ эксплуатационных режимов и проведение испытаний канала усиления с каскадами на лампах ГИ-71А и ГИ-57А с анодным напряжением свыше 27 кВ.

Система ВЧ питания начальной части линейного ускорителя ионов ИЯИ РАН работает на частоте 198,2 МГц и состоит из семи каналов усиления, каждый из которых, в свою очередь, является четырёхкаскадным усилителем (рисунок 1.1).

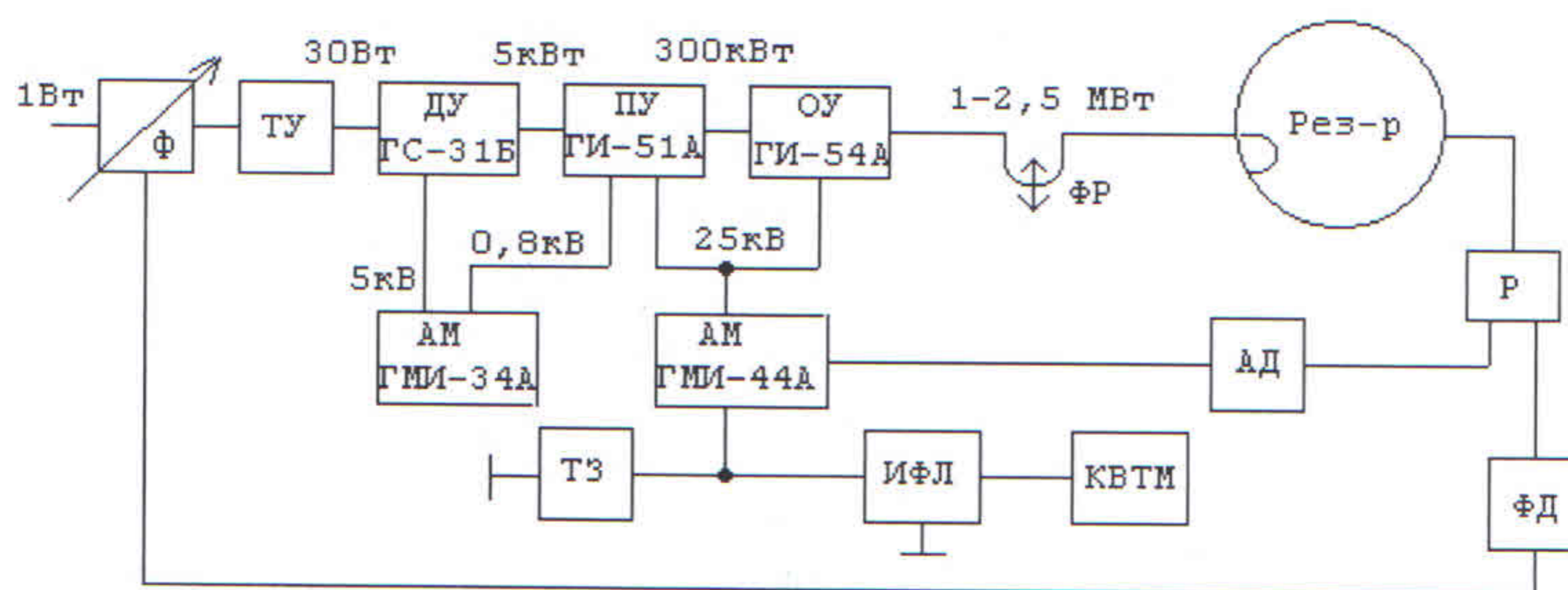


Рисунок 2.1 – Схема ВЧ канала усиления начальной части ускорителя (Ф - фазовращатель, ТУ – транзисторный ВЧ усилитель, ДУ – двухкаскадный ВЧ усилитель, ПУ – предоконечный ВЧ усилитель, ОУ – окончательный ВЧ усилитель, АМ – анодный модулятор, АД – амплитудный детектор, ФД – фазовый детектор, Р = ВЧ разветвитель, ТЗ – тиристорная защита, ИФЛ - искусственная формирующая линия, КВТ – высоковольтный выпрямитель, Рез-р – резонатор ускорителя, ФР – мощный фазовый регулятор.

Наиболее мощные ВЧ каскады, – окончательный и предоконечный, - предусматривают установку в них ламп ГИ-54А и ГИ-51А, разработанных и изготовленных в ОКБ "Светлана" (ныне ЗАО "С.Е.Д. СПб") в 70-е годы прошлого столетия.

В конце 80-х выпуск этих ламп прекращён и ИЯИ РАН в течение 15 лет финансирует проект создания лампы ГИ-71А, которая должна заменить лампу ГИ-54А в окончательном ВЧ каскаде канала усиления. Что касается лампы ГИ-51А, то

вместо неё принято решение устанавливать в предвыходной ВЧ каскад лампу ГИ-57А. Эти замены, конечно, не равнозначны (таблицы 1.1 и 1.2), но, как показывают расчёты, должны обеспечить требуемый режим работы ускорителя при работе на изотопные мишени.

Таблица 2.1 – Основные параметры ламп ГИ-54А и ГИ-71А.

Параметр	Лампа ГИ-54А	Лампа ГИ-71А
Импульсная мощность	5 МВт	3МВт
Мощность рассеяния на аноде	300 кВт	140 кВт
Анодное напряжение	40 кВ	35 кВ
Усиление	25	10
Параметры накала	пост. напр. 5В, 4600 А	~ 16В, 1100 А

Таблица 2.2 – Основные параметры ламп ГИ-51А и ГИ-57А.

Параметр	Лампа ГИ-51А	Лампа ГИ-57А
Импульсная мощность	300 кВт	300 кВт
Мощность рассеяния на аноде	30 кВт	16 кВт
Анодное напряжение	40 кВ	28 кВ
Усиление	25	10
Параметры накала	1.7В, 2000 А	~ 1,7 В, 2000 А

Поскольку в ВЧ каскадах лампа является частью колебательной системы, замена лампы приводит к заметным изменениям в конструкции каскада. И дело не только в различии габаритных размеров ламп, но и в изменении величин межэлектродных емкостей анод-сетка - C_{ag} и катод-сетка - C_{gk} . В схеме ВЧ каскада с общей сеткой первая ёмкость определяет продольные размеры анодно-сеточного, а вторая - катодно-сеточного контуров.

Лампы ГИ-57А и ГИ-71А по своим электрическим параметрам (крутизне S , проницаемости D , коэффициенте усиления μ) также заметно различаются от своих предшественников – ламп ГИ-51А и ГИ-71А. Кроме того, в условиях дефицита времени и ресурсов – финансовых и человеческих, переход на другие лампы осу-

ществлялся с минимальными переделками конструкции ВЧ каскадов. В этой связи очень важно определить условия, в которых будет работать новые лампы в конструкции ВЧ каскада, разработанном и оптимизированном для другой лампы.

Ниже рассмотрен способ определения одного из самых основных параметров, определяющих режим работы лампы – эквивалентного сопротивления анодной нагрузки лампы – R_{oe} .

Расчётная модель

Известно, что электронный КПД лампы ВЧ каскада, работающей с углом отсечки, определяется из выражения:

$$\eta_e = \frac{1}{2} \xi \gamma, \quad (1.1)$$

где $\xi = \frac{U_a}{E_0}$ - коэффициент использования анодного напряжения, U_a - амплитуда ВЧ

напряжения на аноде лампы, E_0 - анодное напряжение питания;

$$\gamma = \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\sin \theta - \theta \cos \theta} \quad (1.2)$$

где θ – угол отсечки анодного тока, который определяется характеристиками лампы, эквивалентным сопротивлением анодной нагрузки лампы R_{oe} и величиной напряжения автосмещения, которое в свою очередь является функцией угла отсечки.

Таким образом, одним из основных параметров ВЧ каскада является эквивалентное сопротивление R_{oe} , которое опосредствованно определяет величины как ξ так и γ .

Как правило, величина R_{oe} определяется не из параметров колебательной системы, а исходя из режима работы ВЧ каскада. Например, предполагается, что угол отсечки

$\theta = \frac{\pi}{2}$. В этом случае по измеренной величине постоянной составляющей анодного тока I_{ao} однозначно определяется величина первой гармоники анодного тока

$I_{a1} = \frac{\pi}{2} I_{ao}$, а по измеренной ВЧ мощности P_{RF} в нагрузке - величина эквивалентного

анодного сопротивления $R_{oe} = \frac{2P_{RF}}{I_{a1}^2 \eta_k}$, где $\eta_k = \frac{Q_0}{Q_0 + Q_l}$, Q_0 - собственная добротность, Q_l

– нагруженная добротность анодно-сеточного контура.

Ниже предлагается другой, более объективный подход, использующий величину измеренной нагруженной добротности и расчётную величину энергии электрического поля, запасённой в анодно-сеточном контуре ВЧ каскада.

Эквивалентное сопротивление анодной нагрузки лампы

Как известно, выражение для добротности колебательной системы (резонатора) имеет вид:

$$Q = \frac{\omega_0 W_e}{P_w} \quad (1.3),$$

где $W_e = \frac{\varepsilon_0}{2} \int (\vec{E}_c)^2 dv$ - энергия, запасённая в колебательной системе, $\varepsilon_0 = 8,8510^{-12}$ Ф/м;

ω_0 - резонансная частота, P_w - мощность потерь в резонаторе и в нагрузке колебательной системы - в зависимости от того, собственную или нагруженную добротность следует определить. Использование выражения (1.3) для параллельного колебательного контура с сосредоточенными параметрами L_k , C_k и R_k приводит к известному соотношению:

$$R_k = \rho_k Q_k \quad (1.4)$$

Таким образом, по известной (измеренной) величине характеристического сопротивления $\rho_k = (\omega_k C_k)^{-1}$, где $\omega_k = (L_k C_k)^{-1/2}$, легко определяется величина эквивалентного сопротивления, подключённого параллельно колебательному контуру. Однако колебательная система ВЧ каскада представляет собой систему с распределёнными параметрами, частью которой является ёмкость анод-сетка лампы. В метровом диапазоне волн, на котором работает система ВЧ питания резонаторов с трубками дрейфа, колебательная система каскада является коаксиальной структурой, в которую органически вписывается коаксиальная конструкция лампы. При этом условие резонанса в случае короткозамкнутой (к.з.) коаксиальной линии имеет вид:

$$l_{sc} = \frac{c}{\omega_0} \operatorname{arctg}(W \omega_0 C_{ag})^{-1} \quad (1.5)$$

Здесь l_{sc} - длина к.з. линии, W - волновое сопротивление коаксиальной линии, ω_0 - резонансная частота, C_{ag} - ёмкость анод-сетка лампы, c - скорость света.

В мощных генераторных лампах, таких как ГИ-54А и ГИ-71А, величина ёмкости лампы приближается к 100 пФ и длина к.з. линии, например, на частоте 200 МГц составляет всего лишь несколько сантиметров. При этом практически вся энергия электрического поля сосредотачивается в ёмкости C_{ag} и в этом случае для оценки величины R_{oe} действительно может быть использовано выражение (1.2), если известна величина добротности. Однако, реально на такой длине невозможно установить узел вывода мощности, устройства подстройки частоты и ввода анодного напряжения в узле электрического поля. Поэтому приходится удлинять коаксиальную линию как минимум на длину $\lambda/2$, равную полуволне резонансной частоты.

В ВЧ каскаде на лампе ГИ-57А ёмкость $C_{ag} = 30$ пФ и поэтому удаётся разместить узлы вывода ВЧ мощности и подстройки без удлинения коаксиального анодно-сеточного контура на величину $\lambda/2$.

На самом деле удлинение коаксиальной линии может и превышать полуволну, если в таких резонаторах в качестве подстроечного элемента используется регулируемая ёмкость C_b между днищем и внутренней трубой коаксиальной линии. Аналогично с длиной l_{sc} (см. выражение 1.5), длина дополнительного отрезка коаксиальной линии l_{ad} определяется из условия резонанса с короткозамкнутой линией, нагруженной с другого конца на ёмкость C_b :

$$l_{ad} = \frac{c}{\omega_o} \arctg(W\omega_o C_b)^{-1} \quad (1.6)$$

Следовательно, в общем случае колебательная система мощного ВЧ каскада может состоять из трёх резонансных отрезков коаксиальной линии. Причём, величину ёмкости C_b ограничивает с одной (большей) стороны электрическая прочность зазора между внутренней трубой коаксиала и днищем, а с другой - условие резонанса (1.6).

Таким образом, для оценки величины энергии, накопленной в коаксиальной колебательной системе, коаксиальную колебательную систему условно можно разбить на три части длиной l_{sc} , $\lambda_o/2$ и l_{ad} , каждая (рисунок 1.2).

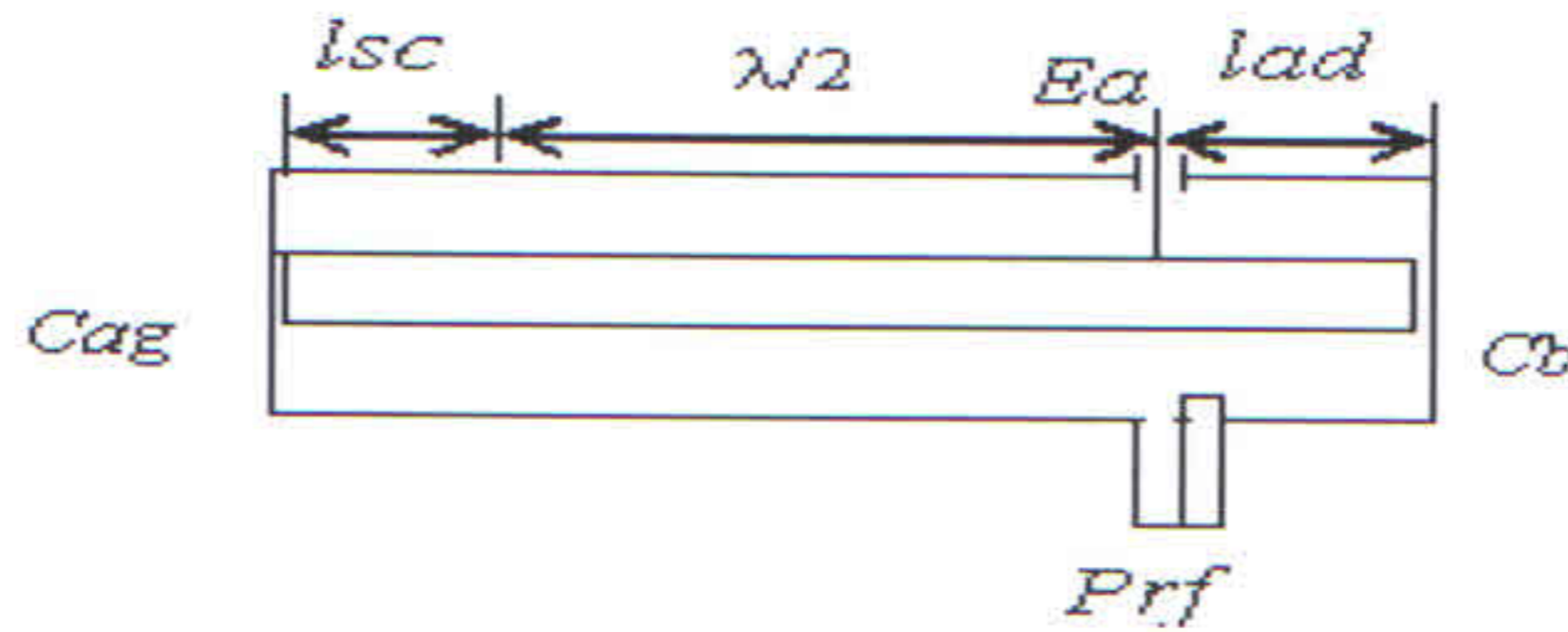


Рисунок 2.2 - Упрощённое представление колебательного контура мощного усилительного ВЧ каскада

Амплитуда ВЧ напряжения $U_{C_{ag}}$ на ёмкости C_{ag} определяется режимом работы лампы. ВЧ напряжение вдоль коаксиального резонатора убывает до нуля в конце первого участка, в середине второго участка достигает своей максимальной величины:

$$U_m = U_{C_{ag}} \sqrt{1 + (\omega_0 C_{ag} W)^2}, \quad (1.7)$$

и в конце третьего участка (на ёмкости C_b) с учётом (1.7):

$$U_{C_b} = U_{C_{ag}} \sqrt{\frac{1 + (\omega_0 C_{ag} W)^2}{1 + (\omega_0 C_b W)^2}} \quad (1.8)$$

Энергия электрического ВЧ поля в первом участке осесимметричной коаксиальной линии может быть представлена в виде:

$$W_{E1} = \frac{C_{ag} U_{C_{ag}}^2}{2} + \pi \epsilon_0 \int_0^{l_{sc} D/2} \int_{d/2}^{D/2} E^2 r dr dl = \frac{U_{C_{ag}}^2}{2} C_1 \quad (1.9)$$

где

$$E = \frac{U_m \sin 2\pi \frac{l}{\lambda}}{r \ln \frac{D}{d}}, \quad (1.10)$$

Подставляя выражение (1.10) в (1.9) получаем:

$$C_1 = C_{ag} + C_C \left(\frac{l_{sc}}{2} - \frac{\lambda}{8\pi} \sin \frac{4\pi}{\lambda} l_{sc} \right), \quad (1.11)$$

где

$$C_C = \frac{120\pi\epsilon_0}{W} (1 + (\omega_0 C_{ag} W)^2). \quad (1.12)$$

В выражении (2.12) C_C - приведенная погонная ёмкость коаксиальной линии;

Энергия электрического поля во втором участке:

$$W_{E2} = C_2 \frac{U_{C_{ag}}^2}{2}, \quad \text{где} \quad C_2 = \frac{\lambda}{4} C_C \quad (1.13)$$

Наконец, на третьем участке $W_{E3} = C_3 \frac{U_{C_{ag}}^2}{2}$, где с учётом выражения (1.8) величина ёмкости C_3 определяется из выражения:

$$C_3 = \left(C_b \frac{1 + (\omega_0 C_{ag} W)^2}{1 + (\omega_0 C_b W)^2} + C_c \left(\frac{l_{ad}}{2} - \frac{\lambda}{8\pi} \sin \frac{4\pi}{\lambda} l_{ad} \right) \right) \quad (1.14)$$

Пренебрегая ВЧ потерями в анодно-сеточном контуре по сравнению с мощностью, выводимой из контура в нагрузку, представим выражение для нагруженной добротности Q_l в виде:

$$Q_l = \frac{\frac{U_{C_{ag}}^2}{2} \omega_0 \sum_{i=1}^3 C_i}{U_{C_{ag}}^2 / 2R_{oe}},$$

откуда получаем искомое выражение для определения R_{oe} :

$$R_{oe} = Q_l \left(\omega_0 \sum_{i=1}^3 C_i \right)^{-1}, \quad (1.15)$$

где величины емкостей C_i определяются из выражений (1.11), (1.13) и (1.14). Структурно, выражение (1.15) совпадает с (1.4) и поэтому выражение (1.15) можно представить в виде:

$$R_{oe} = Q_l \rho_{oe}, \quad \text{где } \rho_{oe} = \left(\omega_0 \sum_{i=1}^3 C_i \right)^{-1} \quad (1.16)$$

Практически, нагруженная добротность определяется стандартными способами при подключении узла вывода ВЧ мощности ВЧ каскада к согласованной нагрузке. Что касается определения емкостей $C_1 - C_3$, то их вычисление не вызывает трудностей, если известны размеры коаксиального контура и ёмкость лампы C_{ag} . Все приведенные выше рассуждения предполагают осесимметричную структуру ВЧ поля в анодно-сеточном контуре ВЧ каскада, хотя реально это условие не совсем соблюдается.

Экспериментальные измерения, выполненные на пяти выходных каскадах системы ВЧ питания резонаторов с трубками дрейфа ускорителя ИЯИ РАН, показали, что нагруженная добротность анодно-сеточных контуров лежит в пределах $Q_l = 100-200$, а расчётная величина $\rho_{oe} \sim 1 \text{ Ом}$. Отсюда следует, что величина $R_{oe} \sim 100-200 \text{ Ом}$. При этом собственная добротность контуров (при отключённой нагрузке) составляет 3000- 4000.

Аналогичные измерения и расчёты для макета ВЧ каскада на лампе ГИ-57А показали, что величина R_{oe} , которую "чувствует" лампа ГИ-57А при установке её в ВЧ каскад, разработанный для лампы ГИ-51А, составляет ~ 600 Ом. При этом нагруженная добротность анодно-сеточного контура составляет $100 - 120$ Ом, а собственная добротность около 2000.

Определение предельно-допустимых эксплуатационных характеристик.

На основании приведенных выше соображений нетрудно провести предварительный анализ режима лампы оконечного ВЧ каскада и сравнить полученные результаты с предельно-допустимыми параметрами лампы ГИ-71А.

По известной величине эквивалентного анодного сопротивления и требуемой величине выходной импульсной ВЧ мощности определяем амплитуду первой гармоники анодного тока лампы:

$$I_{a1} = \sqrt{\frac{2P_{rf}}{R_{oe}}} \quad (1.16)$$

Полагая, что угол отсечки близок к $\pi/2$, определяем постоянную составляющую тока анода:

$$I_{a0} = \frac{2}{\pi} I_{a1} \quad (1.17)$$

Амплитуду анодного переменного напряжения, в свою очередь, определим из выражения:

$$U_a = I_{a1} R_{oe}$$

Задаваясь коэффициентом использования анодного тока $\xi = 0.8$, можно, наконец, определить амплитуду импульса анодного напряжения:

$$E_a = \frac{U_a}{\xi} = \frac{I_{a1} R_{oe}}{\xi} \quad (1.18)$$

При этом электронный КПД ВЧ каскада определяется из выражения (1.1).

На основании выражений (1.16) – (1.18) оценим режим работы лампы оконечного ВЧ каскада исходя из определённой выше величины R_{oe} и требуемого уровня выходной ВЧ мощности P_{rf} . Полагая заданными величину ВЧ мощности в анодной нагрузке ВЧ каскада (R_{oe}), равную $P_{rf} = 2,5$ МВт и $R_{oe} = 100$ Ом получа-

ем: $I_{a1} = 224 \text{ А}$, $I_{a0} = 142 \text{ А}$, $E_a = 28 \text{ кВ}$, $\eta = 0.63$, мощность, рассеиваемую на аноде лампы оконечного ВЧ каскада $P_a = \frac{P_0(1-\eta)}{s} = 58 \text{ кВт}$ при скважности $s = 25$ (частота повторения ВЧ импульсов 100 Гц).

Из приведенных расчётов и данных таблицы 1.1 видно, что лампа ГИ-71А с запасом обеспечивает требуемый уровень ВЧ поля в резонаторе, не выходя за предельно-допустимые параметры, и может работать в ВЧ канале вместо лампы ГИ-54А. При этом с предоконечного каскада должна поступать ВЧ мощность, обеспечивающая приведенный выше режим работы лампы выходного каскада.

Следует обратить внимание на то, что в структуре канала усиления предусмотрен один анодный модулятор на лампы оконечного и предоконечного ВЧ каскадов (рисунок 2.1), т.е. импульсные анодные напряжения на лампах ГИ-71А и ГИ-57А – равны. Из таблицы 2.2 видно, что предельное анодное напряжение для лампы ГИ-57А совпадает с величиной, определённой для лампы ГИ-71А при выходной ВЧ мощности 2,5 МВт. Таким образом, использование лампы ГИ-57А в качестве возбудителя лампы ГИ-71А приводит к необходимости выхода на предельно-допустимую величину анодного напряжения для лампы ГИ-57А.

В этой связи предполагается провести совместно с разработчиком (СЕД-СПб) серию испытаний с целью проверки возможности повышения предельной величины анодного импульсного напряжения до 32-35 кВ

Разработка макета ВЧ каскада на лампе ГИ-57А

Как уже указывалось выше, переход на другие типы ламп требует существенного изменения конструкции ВЧ каскада. Предоконечный ВЧ каскад на лампе ГИ-51А был разработан под схему с общим катодом, поскольку лампа ГИ-51А является тетродом и наличие дополнительной экранной сетки между анодом и управляющей сеткой существенно снижает величину ёмкости C_{ag} , которая создаёт паразитную обратную связь в ВЧ каскаде с общим катодом. Лампа ГИ-57А является триодом и поэтому ВЧ каскад с лампой ГИ-57А собран по схеме с общей сеткой, поскольку в этой схеме паразитная обратная связь создаётся небольшой ёмкостью C_{ak} . Такая схема, конечно, имеет меньшее усиление, чем схема с общим катодом, и

поэтому потребуется увеличение импульсной ВЧ мощности с каскадов К1, К2 (рисунок 1.1) до $8\div 10$ кВт. При разработке макета ВЧ каскада на лампе ГИ-57А была поставлена задача минимальных переделок в существующей конструкции (рисунок 2.3).

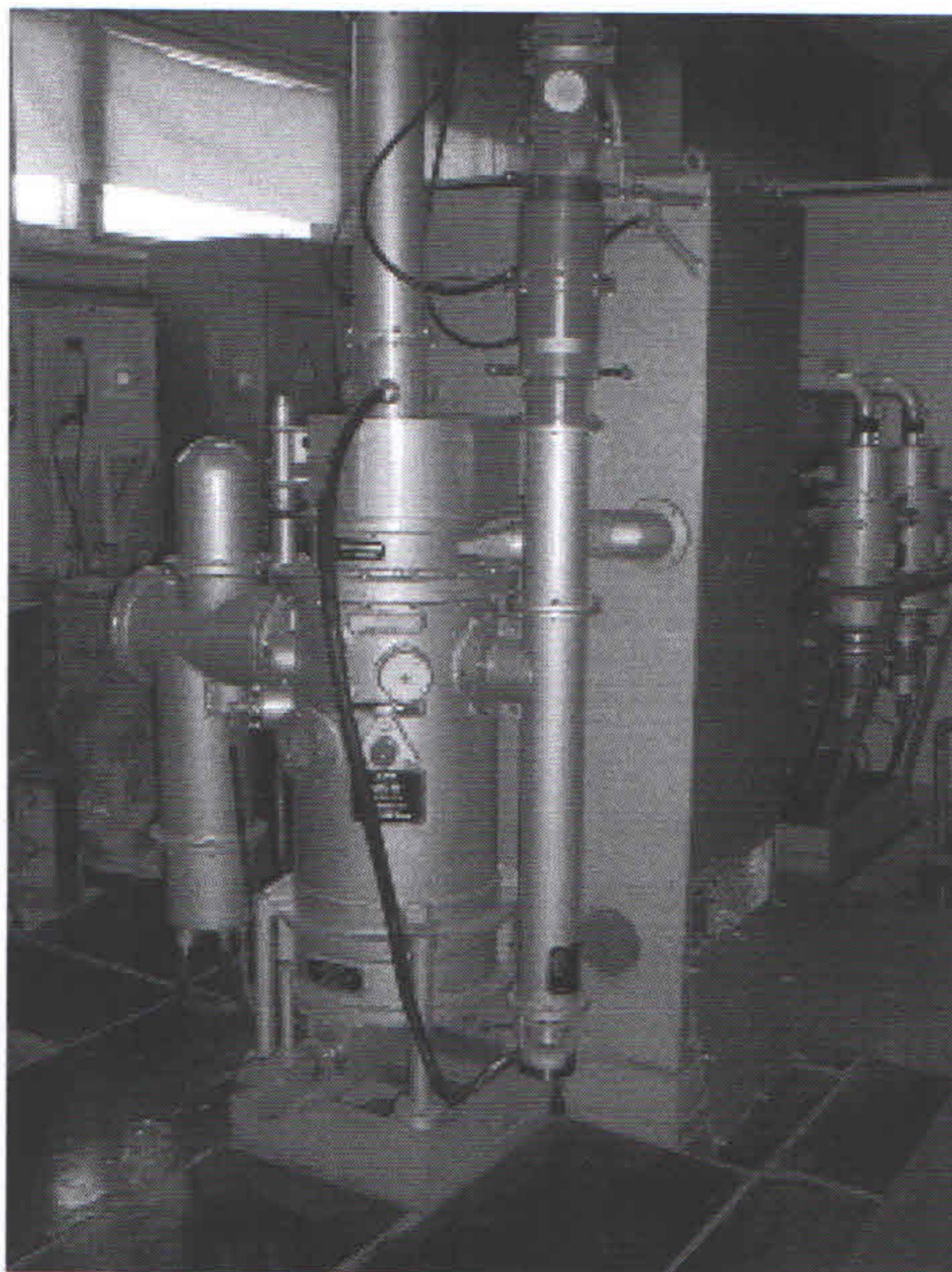


Рисунок 2.3 - Предоконечный ВЧ каскад на лампе ГИ-51А.

На рисунках 2.4 и 2.5 представлены чертежи общего вида предоконечного ВЧ каскада, переделанного под лампу ГИ-57А. Из них видно, что полной переделке подвергается катодно-сеточный контур, в то время как переделка анодно-сеточного контура, наиболее трудоёмкого в изготовлении, заключается в добавлении нескольких деталей.

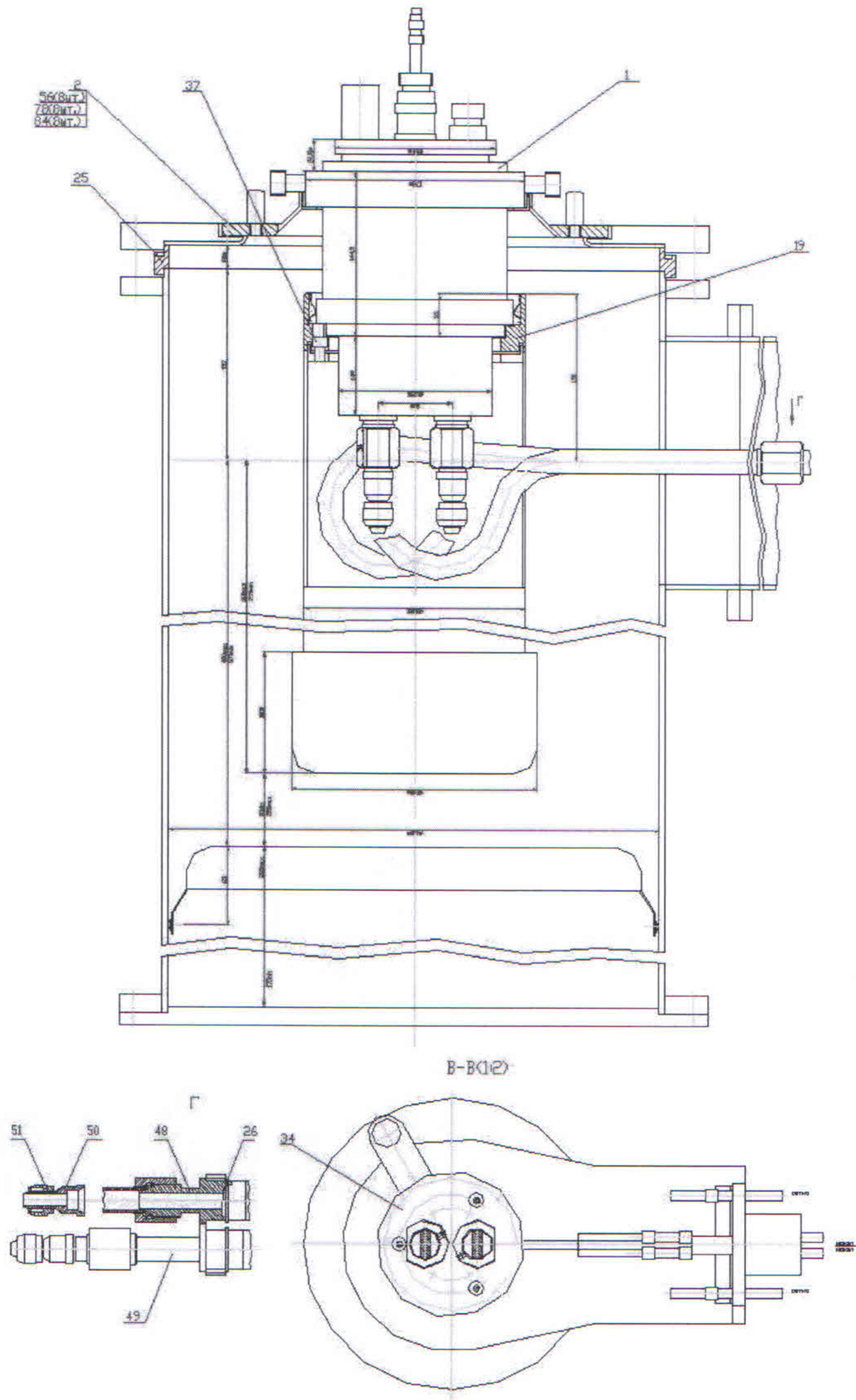


Рисунок 2.4 - Конструкция анодно-сеточного контура ВЧ каскада на лампе ГИ-57А.

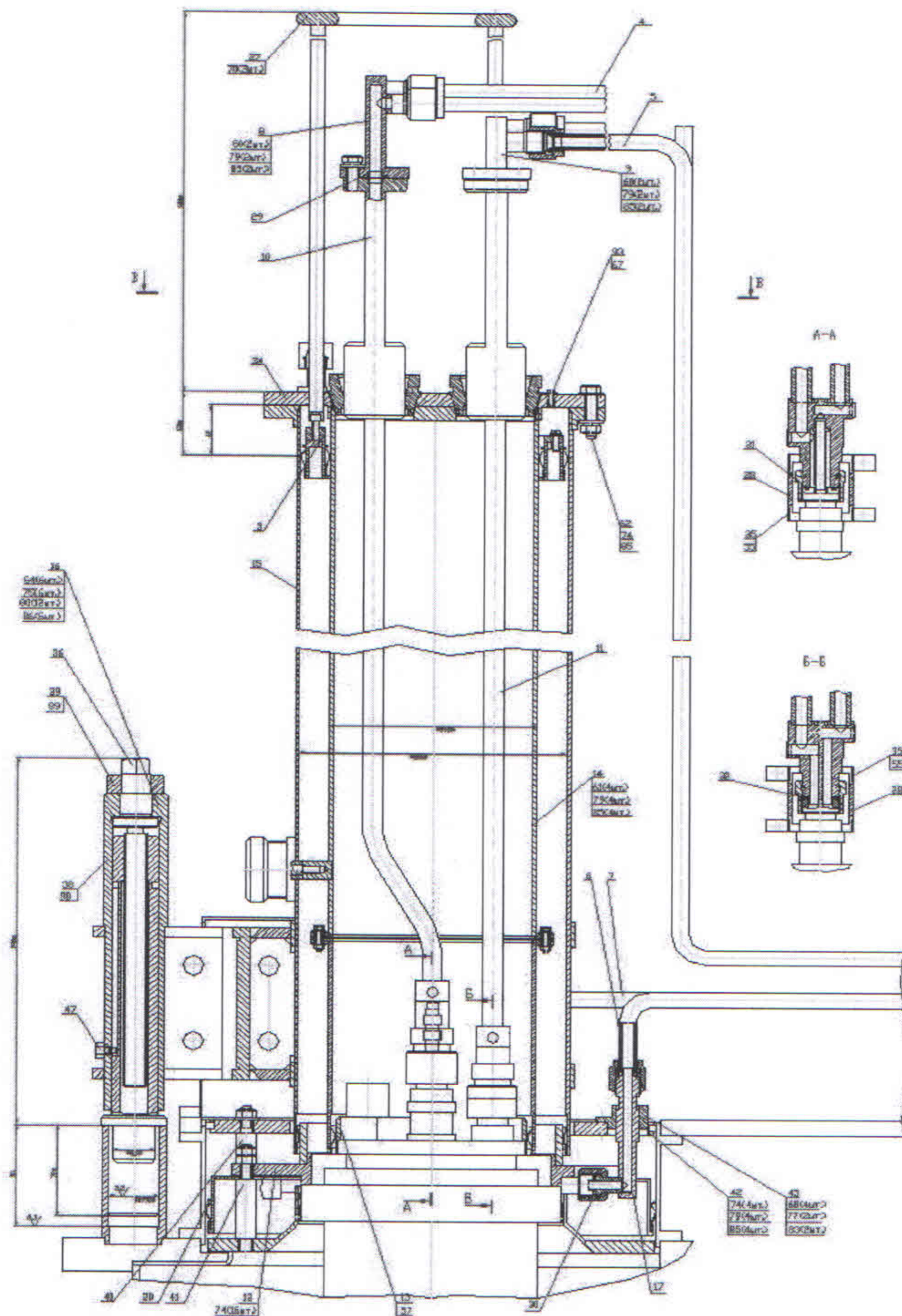


Рис. 2.5 - Конструкция катодно-сеточного контура ВЧ каскада на лампе ГИ-57А.

Разработка макета ВЧ каскада на лампе ГИ-71А

Аналогичная ситуация имеет место при разработке макета ВЧ каскада на лампе ГИ-71А. Здесь ситуация несколько проще, поскольку разработка лампы на-

чалась более десяти лет назад, как альтернатива лампе ГИ-54А, выпуск которой был прекращён в конце 80-х годов прошлого века. Одним из требований ТЗ было сохранение величины ёмкости сетка - анод и размера анодной части лампы с тем, чтобы сохранить размеры анодно-сеточного контура. Однако, параметры катодной части лампы ГИ-71А, включая накал, существенно отличаются от аналогичных параметров лампы ГИ-54А (таблица 2.1). Поэтому основной узел, требующий полной замены при переходе на лампу ГИ-71А, является катодно-сеточный узел. На приведенной ниже фотографии оконечного ВЧ каскада (рисунок 2.6) катодно-сеточный контур находится в верхней части ВЧ каскада.

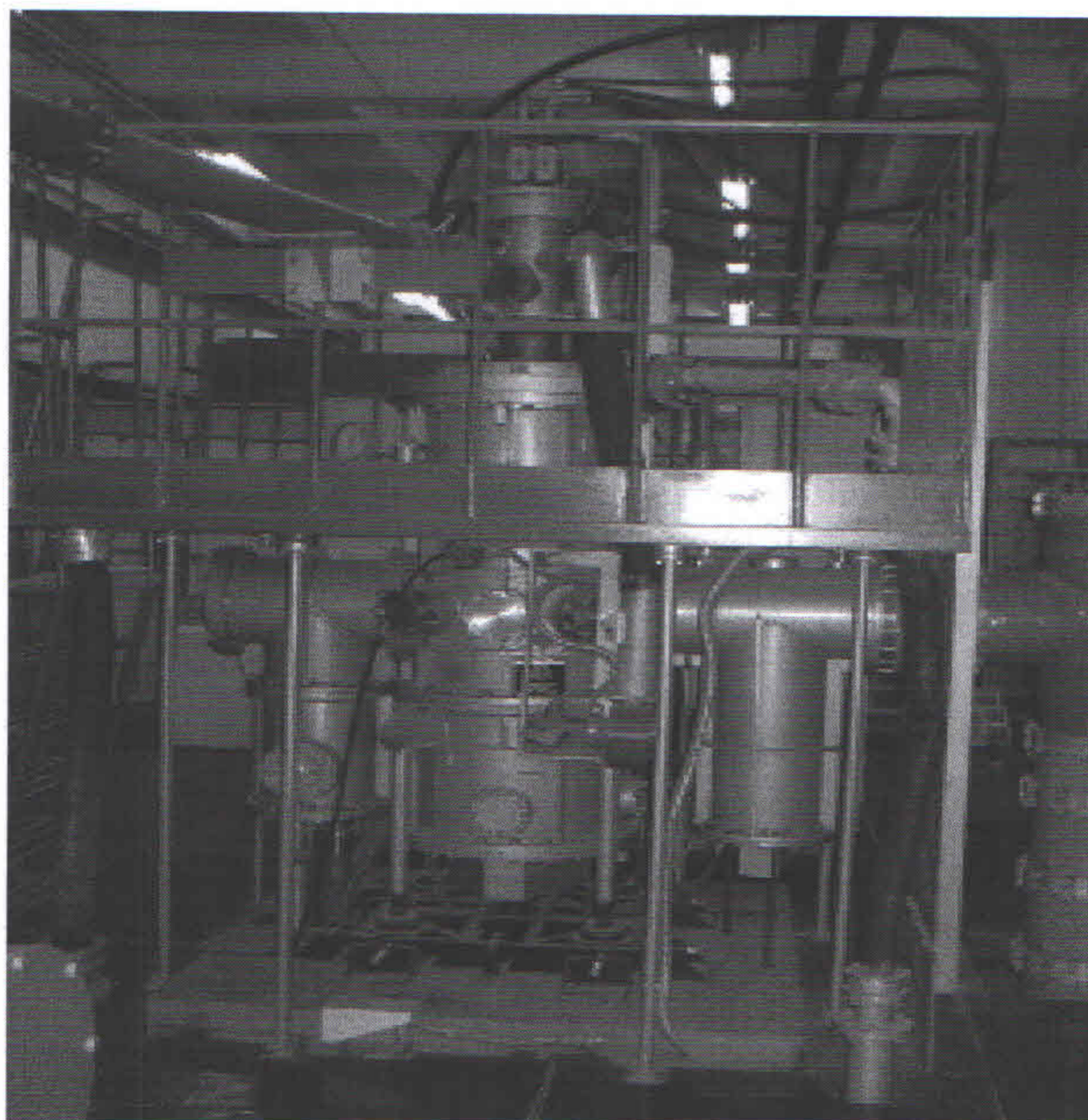


Рисунок 2.6 - ВЧ каскад на лампе ГИ-54А

Исследование режимов работы аппаратуры системы ВЧ питания на частоте повторения импульсов 100 Гц.

Системы ВЧ питания работают с частотой повторения ВЧ импульсов 50 Гц. Эта частота совпадает с частотой питающей сети, что позволяет ликвидировать неста-

бильности ускоряющего ВЧ поля в резонаторах ускорителя, обусловленные пульсацией питающих напряжений.

Переход на удвоенную частоту повторения ВЧ импульсов приводит к появлению следующих проблем:

- Удвоение средней мощности ВЧ потерь на анодах ламп ВЧ каналов усиления и ламп анодных модуляторов, а также мощности ВЧ потерь в контактных группах конструктива ВЧ каскадов, коаксиальной фидерной системы и узлов ввода ВЧ мощности в резонаторы ускорителя.
- Понижение на 3-5 град. температуры теплоносителя в системах охлаждения трубок дрейфа и корпуса резонаторов. Это приводит к необходимости повышения мощности холодильных установок, особенно в случае работы в тёплое время года. В таблице 1.3 в качестве примера приведены измерения температуры воды, охлаждающей трубки дрейфа резонаторов № 2, 3, 5 в зависимости от частоты повторения ВЧ импульсов, т.е. от величины ВЧ потерь в стенках резонаторов.

Таблица 2.3 – Температурные режимы резонаторов на разных частотах повторения импульсов.

№ резонатора	Температура воды при частоте 10 Гц	Температура воды при частоте 50 Гц	Температура воды при частоте 100 Гц
2	26.4	25.6	24.4
3	23.8	21.5	18
5	31	25.5	18.5

- «Удвоение» огибающих ВЧ поля в резонаторе из-за наложения 50-герцовых пульсаций питающих напряжений на 100-герцовую последовательность ВЧ импульсов (рисунок 2.7). Источниками этих пульсаций является, в основном, анодный импульсный модулятор, в котором анодное питание и напряжение смещения модуляторной лампы ГМИ-44А осуществляется от выпрямителей, подключённых к 50-герцовой сети, и от этой же сети питается накал модуляторной лампы. Из трёх перечисленных проблем наиболее сложной является последняя,

поскольку до сих пор не совсем понятны способы подавления модуляции амплитуды ВЧ поля в резонаторе. Последние экспериментальные исследования показали, что одним из основных источников модуляции является накал модуляторной лампы ГМИ-44А.

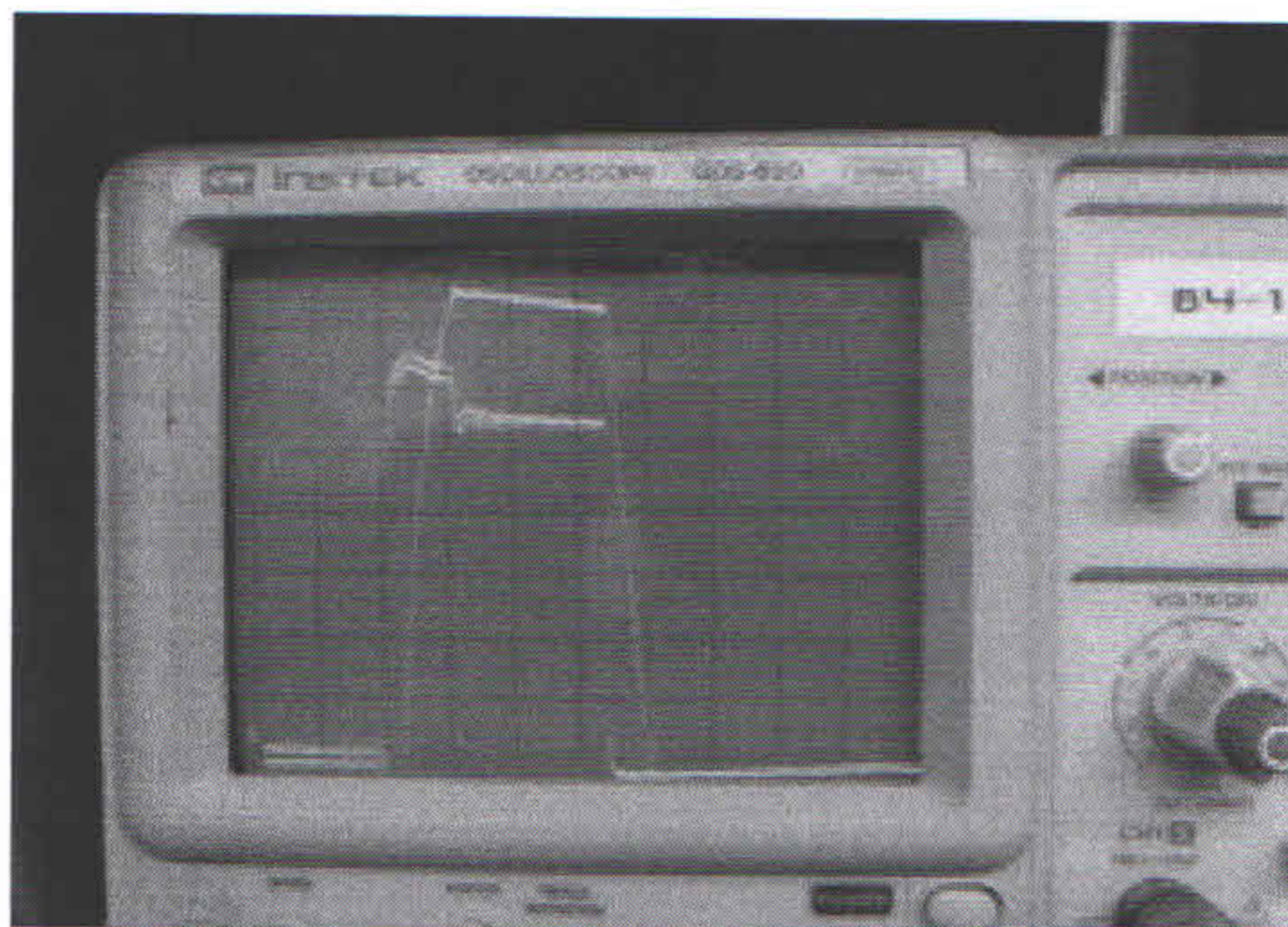


Рисунок 2.7 - Осциллограммы огибающей ВЧ поля в резонаторе и импульса анодного модулятора при частоте повторения ВЧ импульсов 100 Гц.

3 Разработка программ проведения дальнейших исследований, обоснование их использования

Общая информация об УСУ.

Линейный ускоритель Московской мезонной фабрики предназначен для получения высокоинтенсивных пучков протонов и отрицательных ионов водорода со средним суммарным током ионов обоих знаков заряда 0,5 мА при энергии 600 МэВ и генерации высокоинтенсивных пучков вторичных частиц: мюонов, пи-мезонов, нейтрино, нейтронов и нейтральных атомов водорода. Длительность макроимпульса пучка 100 мкс при частоте повторения 100 Гц. Инжектором служит ускорительная трубка, питаемая высоковольтным импульсным трансформатором на 750 кВ. Начальная часть ускорителя состоит из 5 резонаторов с трубками дрейфа с ВЧ питанием от триодных генераторов на частоте 198,2 МГц с импульсной мощностью до 5 МВт. Основная часть ускорителя на энергию 600 МэВ (длина 360 м) состоит из 27 резонаторов с проводящими шайбами и диафрагмами с ВЧ питанием на частоте 991 МГц от клистронных генераторов с импульсной мощностью 4,75 МВт. Предусмотрен промежуточный вывод пучка с энергией до 160 МэВ для прикладных работ. Фокусировка пучка обеспечивается квадрупольными линзами трубок дрейфа начальной части ускорителя и квадрупольными дублетами между ускоряющими секциями основной части ускорителя. Автоматизированное управление ускорителя обеспечивается пятью секторными ЭВМ и шестью ЭВМ центрального пульта. Предусмотрена возможность увеличения среднего тока ускорителя до 1,0 -2,0 мА.

В настоящее время в мире существуют три ускорителя класса мезонных фабрик: линейный ускоритель Лос-Аламоской мезонной фабрики (США) на энергию 800 МэВ и средний ток 1000 мкА, синхроциклотрон на энергию 595 МэВ и средний ток 250 мкА в Виллингене (Швейцария) и циклотрон ТРИУМФ для ускорения отрицательных ионов водорода на энергию 520 МэВ и средний ток 250 мкА в Ванкувере (Канада).

Основные направления развития УСУ ЛУММФ.

Предполагается развитие УСУ «Линейный ускоритель ионов водорода и импульсный источник нейтронов ИЯИ РАН» по следующим основным направлениям:

- Совершенствование и модернизация материально-технической базы.
- Разработка технологии получения перспективных изотопов для диагностики и лечения различных заболеваний с использованием УСУ.
- Расширение деятельности УСУ по обеспечению и развитию исследований на УСУ в форме коллективного пользования.
- Мероприятия по обеспечению достоверности и точности измерений.

Совершенствование и модернизация материально-технической базы УСУ ЛУММФ.

Совершенствование и модернизация материально-технической базы УСУ «Линейный ускоритель ионов водорода и импульсный источник нейтронов ИЯИ РАН» является приоритетным направлением развития УСУ. В период с 2011 по 2012 годы работы по этому направлению будут включать работы по модернизации научного оборудования, входящего в состав УСУ с целью расширения его технических возможностей, приобретение расходных материалов и организацию плановых профилактических работ для обеспечения условий эффективного функционирования УСУ.

Выполнены следующие работы по совершенствованию и модернизации материально-технической базы УСУ ЛУММФ:

- установка и реализация систем прецизионного формирования протонного пучка на мишени радиоизотопного Комплекса ИЯИ РАН;
- модернизация АСУ ускорителя и изотопного комплекса ИЯИ РАН;
- анализ возможной оптимизации технологии получения перспективных медицинских изотопов.

В рамках совершенствования и модернизации материально-технической базы УСУ ЛУММФ выполнены следующие работы:

- Разработка и ввод в научную эксплуатацию новых элементов систем формирования и измерения параметров пучка.
- Продолжение расчетных и экспериментальных работ по совершенствованию системы высокочастотного питания ускорителя.
- Проведение работ по обеспечению единства и достоверности измерений.
- Обсуждение и подготовка проектов новых экспериментов по перспективным медицинским изотопам.
- Модернизация АСУ и систем формирования пучка ускорителя и изотопного комплекса ИЯИ РАН.

Разработка технологии получения перспективных изотопов для диагностики и лечения различных заболеваний с использованием УСУ.

Разработка технологии получения перспективных изотопов для диагностики и лечения различных заболеваний с использованием УСУ направлена на расширение спектра получаемых изотопов для диагностики и лечения заболеваний с использованием уникальных возможностей линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН, расширение сферы предоставляемых услуг коллективного пользования, обеспечение достоверности и точности проводимых измерений на УСУ, использование технических возможностей УСУ в полном объеме.

Разработаны следующие методики для УСУ «Линейный ускоритель ионов водорода и импульсный источник нейтронов ИЯИ РАН»:

- Методика настройки ускоряющих и фокусирующих полей с использованием модернизированных элементов АСУ ускорителя.
- Методика настройки режимов ускорения малых и больших ускоряемых то-

ков пучка с использованием новых и модернизированных элементов системы диагностики пучка.

- Методика стабилизации ускоряющих и фокусирующих полей УСУ ЛУММФ с использованием разработанных систем управления, блокировки и сигнализации (УБС).
- Методика повышения надежности и эффективности работы УСУ на основе комплекса мер по модернизации основных систем (система ВЧ питания, системы электропитания, охлаждения и термостабилизации, диагностики пучка, УБС и АСУ УСУ ЛУММФ).

Разрабатываемые методики позволят проводить весь комплекс планируемых исследований как в рамках задач Изотопного комплекса ИЯИ РАН, так и в рамках Программы фундаментальных и прикладных исследований на УСУ ЛУММФ с привлечением широкого круга пользователей из других организаций и ведомств РФ.

Расширение деятельности УСУ ЛУММФ по обеспечению и развитию исследований в форме коллективного пользования.

Основными задачами по расширению деятельности УСУ «Линейный ускоритель ионов водорода и импульсный источник нейтронов ИЯИ РАН» по обеспечению и развитию исследований в форме услуг коллективного пользования оборудования являются:

- Увеличение числа пользователей УСУ и расширение «географии» пользователей.
- Совершенствование и модернизация материально-технической базы УСУ.
- Создание условий для достижения высоких значений использования («загрузки») дорогостоящего оборудования в научных процессах

- Увеличение числа аттестованных методик проведения исследований и реализации технологических процессов.
- Повышение квалификации на базе УСУ и увеличение числа подготовленных высококвалифицированных специалистов.
- Увеличение числа ученых, студентов и аспирантов организаций и вузов Российской Федерации, использующих УСУ для проведения НИР.

Мероприятия по обеспечению достоверности и точности измерений для обеспечения выполнения Программы исследований на УСУ ЛУММФ.

Достоверность и точность измерений, выполняемых на УСУ «Линейный ускоритель ионов водорода и импульсный источник нейтронов ИЯИ РАН» обеспечивается выполнением следующих мероприятий:

- Организация поверки научного оборудования УСУ ЛУММФ.
- Применение и разработка стандартных и новых методов для аттестации используемого уникального оборудования линейного ускорителя ИЯИ РАН.
- Разработка методик исследований и испытаний состава и качества получаемых изотопов для медицины и промышленности.

4 Обобщение, оценка результатов выполненной НИР и возможности их применения

Проведен анализ эксплуатационных режимов и выполнены испытания канала усиления с каскадами на лампах ГИ-71А и ГИ-57А с анодным напряжением свыше 27 кВ. Испытания проводились на существующем наладочном канале усиления с выходной мощностью до 1 МВт на ВЧ эквивалент нагрузки при частоте повторения 50 Гц. Результаты испытаний учтены при разработке документации на макеты каскадов. Определены требования к характеристикам лампы ГИ-71А и режимам работы лампы ГИ-57А.

Проведен анализ предельно допустимых эксплуатационных режимов канала усиления с каскадами на лампах ГИ-71А и ГИ-57А. Показано, что ограничения наступают по величине анодного напряжения и мощности рассеяния на аноде лампы ГИ-57А при частоте повторения импульсов 100 Гц. Необходимы совместные с разработчиком испытания ламп при анодном импульсном напряжении до 32-35 кВ.

Разработаны предварительные требования к макетам ВЧ каскада на лампе ГИ-57А и на лампе ГИ-71А.

Исследованы режимы работы аппаратуры системы ВЧ питания на частоте повторения импульсов 100 Гц. Помимо очевидных проблем, обусловленных удвоением рассеиваемой мощности по сравнению с освоенным режимом работы на частоте 50 Гц, выявлена модуляция (двоение) уровня выходной мощности.

Исследована возможность работы существующего инжектора на частоте 100 Гц. Показано, что для обеспечения работы на 100 Гц необходимо создание нового инжектора. С целью сокращения сроков и стоимости работ по созданию нового инжектора исследована возможность использования узлов и систем существующего инжектора. Показано, что часть систем и узлов существующего инжектора может быть использована при создании нового. В то же время ключевые устройства и системы, такие как генератор высоковольтных импульсов, высоковольтный трансформатор, стойка диодной стабилизации, вакуумная система, система питания ионного источника и система управления ионного источника должны быть заменены.

Разработан предварительный проект быстрого дефлектора. Сформулированы требования к системе быстрого отклонения пучка, выбрана конфигурация на основе высоковольтной резонансной колебательной системы, выполнен расчет дефлектора, проведена проверка правильности выбранных решений на специально созданном стенде.

5 Проведение оценки рыночного потенциала полученных результатов

Перспективы технологий позитронной эмиссионной томографии в медицине.

Периоды полураспада, характерные для большинства позитрон-излучающих радионуклидов (единицы, десятки минут), требуют наличия в составе госпитально-дислоцированных ПЭТ-центров следующего достаточно сложного и дорогого оборудования:

- ускоритель для наработки позитрон-излучающих нуклидов;
- мишенная система для получения и выделения этих нуклидов;
- радиохимическая лаборатория для синтеза и анализа РФП;
- ПЭТ-сканер (один или несколько) для проведения диагностических и др. исследований.

Все это обусловило довольно высокую стоимость ПЭТ-метода, что существенно сдерживало внедрение его в клинику, особенно в первые 15-20 лет. В эти годы большинство специалистов считало, что ПЭТ должен использоваться в основном для исследований фундаментальных проблем медицины и биологии. Однако за более чем 30-летний период метод успешно прошел стадию экспериментальных исследований, продемонстрировал свои широкие возможности для клинической диагностики и в последние годы активно внедряется в клиническую практику.

Важность клинического значения ПЭТ состоит в том, что этот метод позволяет:

- Осуществлять раннюю диагностику сложных заболеваний.
- Оценивать функциональное состояние и жизнеспособность органов и тканей.
- Осуществлять раннюю диагностику метастазирования и генерализации патологического процесса в онкологии.
- Практически на порядок снизить дозовые нагрузки на пациента при исследованиях.
- Оперативно оценивать эффективность медикаментозной, лучевой и химиотерапии, выбирать наиболее эффективную тактику лечения.

В последние 10-15 лет современные госпитали в мире стали активно оснащаться ПЭТ-центрами. На возникшем и быстро расширяющемся рынке оборудования для ПЭТ центров стали работать такие ведущие мировые фирмы как «Дженерал Электрик» (США), СТИ (США) и ИВА (Бельгия), которые разработали и выпускают циклотроны специально для ПЭТ-центров, фирмы «Сименс» (Германия), «Дженерал Электрик» (США), «Филипс» (Голландия), которые и организовали выпуск различных ПЭТ-сканеров (томографов) для ПЭТ-исследований. Необходимо отметить, что, если до начала второго тысячелетия этими фирмами выпускались ПЭТ-сканеры только для ПЭТ-исследований, то, начиная уже с 2005 года эти фирмы прекратили выпуск таких ПЭТ-сканеров и перешли на производство комбинированных томографических систем, так называемых ПЭТ-КТ, где совмещены ПЭТ и компьютерный многосрезовой томограф. Несмотря на более высокую стоимость такого оборудования (порядка 3,5-4,5 млн. долларов США по сравнению с 1,5-2,5 млн.), заметное улучшение качества диагностики, получаемое при их использовании, не только уменьшило, а даже увеличило спрос на эти установки. И уже к 2006 году эти фирмы выпустили и продали по несколько сотен таких ПЭТ-КТ.

Перспективные направления развития отечественной радиофармацевтики:

- индикаторы для выявления атеросклеротических бляшек;
- индикаторы апоптоза, гипоксии, ангиогенеза;
- высокоспецифические РФП для диагностики различных новообразований;
- предикторы реакции на медикаменты (основанные на оценке рецепторики);
- препараты для радиотерапии альфа- и бета-излучателями;
- широкое распространение пептид-связанной диагностики и радиотерапии;
- расширение области применения фтора-18 для ПЭТ;
- применение наномодифицированных материалов для направленной доставки лекарственных средств к органам-мишеням.

Основные задачи отечественной ядерной медицины:

- модернизация и переоснащение действующих отделений лучевой терапии и радионуклидной диагностики;

- организация производства отечественной аппаратуры для лучевой и радионуклидной диагностики и терапии;
- организация специализированных производств радионуклидов и радиофармацевтических препаратов по международным правилам GMP;
- создание Центров ядерной медицины, включая ПЭТ-центры, в ведущих клиниках страны;
- проектирование и строительство палат для лучевой терапии открытыми источниками.

По результатам проведенного аналитического обзора современной научно-технической, нормативной и методической литературы в области ядерной медицины можно сделать следующие выводы.

Преимущества, а в ряде случаев и незаменимость методов ядерной медицины обусловили на протяжении нескольких последних десятилетий её устойчивое развитие и превращение в неотъемлемую часть клинической практики в развитых странах.

Мировое производство и потребление радиофармацевтических препаратов растет ежегодно на 10-15%. На нужды ядерной медицины расходуется более 50% годового производства радионуклидов во всем мире. Только в США с использованием радионуклидов ежегодно производится около 13 млн. диагностических процедур и 100 млн. лабораторных тестов, применяется около 50 тысяч терапевтических доз, в области ядерной медицины практикуют более 30 тысяч специалистов. Объем рынка радиоизотопной медицинской продукции к 2020 году оценивается в 20 млрд. долларов.

Современное развитие мировой ядерной медицины характеризуется следующими особенностями:

- увеличением объема выпуска радионуклидов медицинского назначения (так, за последнее время ежегодный прирост продукции составляет до 15%);

- возрастающим числом потребителей - в мире функционируют более 100 специализированных ядерных медицинских комплексов; в ближайшие годы ожидается увеличение их числа в 2 раза;
- опережающим ростом потребления радионуклидов терапевтического назначения;
- расширением областей приложений диагностических тестов;
- повышением требований к технологиям получения радионуклидов (экономическая рентабельность, технологическая и экологическая безопасность).

Заключение

В рамках запланированных работ по этапу № 4 государственного контракта от 12 мая 2011 г. № 16.518.11.7037 проведена работа, по результатам которой можно сделать следующие выводы.

1. На линейном ускорителе ИЯИ РАН (структура ускорителя, характеристики, достигнутые показатели надежности и основные параметры пучка) можно производить весь спектр ускорительных радиоизотопов для медицины. Основной задачей для повышения эффективности работы по ядерной медицине является повышение надежности работы основных систем ускорителя, развитие и совершенствование систем диагностики параметров пучка, АСУ с использованием современной электронной техники, систем стабилизации, блокировки и сигнализации.

2. Проведены детальные экспериментальные исследования характеристик высокочастотной системы ускорителя при работе с новыми моделями генераторных ламп, сформулированы предварительные требования к испытательным стендам, проведены необходимые расчеты режимов работы, в том числе и при переходе на режим работы ускорителя с частотой повторения импульсов 100 Гц.

Проведена плановая калибровка системы диагностики параметров пучка как в продольной, так и в поперечной плоскостях, разработаны и оптимизированы автоматизированные процедуры настройки ускорителя- системы формирования пучка на инжекторном комплексе, системы термостабилизации и регулирования ускоряющих полей, выполнен плановый комплекс профилактических работ по оборудованию и основным системам всего ускорителя.

Разработан пакет программ автоматизированной системы управления ускорителя, позволяющий по результатам обработки экспериментальных данных проводить оценку рабочих параметров пучка на мишени изотопного комплекса ИЯИ РАН. Полученные результаты позволяют формировать пучок ускоренных

протонов на облучаемых мишенях с заданными параметрами в широком диапазоне энергий, а также достаточно оперативно оценивать размеры пучка на мишени и проводить при необходимости их коррекцию. Это дает возможность фактически в режиме реального времени контролировать с высокой степенью надежности процесс облучения мишени, что также повышает надежность и безопасность работы Изотопного комплекса.

3. Проведены рабочие сеансы ускорителя, в которых основной задачей на данном этапе работы являлись запланированные экспериментальные исследования высокочастотной системы ускорителя, анализ полученных экспериментальных данных по условиям работы системы высокочастотного питания и системы измерения параметров пучка, канала транспортировки инжекторного комплекса линейного ускорителя ИЯИ РАН. Надежность работы этих систем ускорителя практически полностью определяет надежность и стабильность работы ускорителя в целом.

Проведены исследования режимов работы ускорителя при работе на Изотопный комплекс - процедуры измерения, оптимизации и стабилизации основных параметров ВЧ системы, фокусирующей системы и параметров пучка в режимах малой и большой интенсивности первичного пучка протонов.

4. Самое главное требование к проведению сеансов облучения мишеней для получения медицинских радиоизотопов – безопасность для работающего на установке персонала. Работы и исследования в этом направлении ведутся на постоянной основе. Проведен дополнительный анализ работы разработанных систем безопасности, блокировок и сигнализации, системы потерь частиц ускорителя и Изотопного комплекса ИЯИ РАН на соответствие всем установленным нормам и правилам при работе с радиоактивными веществами и, тем не менее, все эти системы постоянно совершенствуются как по элементной базе, так и по структурному исполнению. Разработанная и апробированная на практике методика проведения сеанса облучения мишеней радиоизотопов доказала свою надежность и эффективность.

Список использованных источников

1. Л.В.Кравчук “Развитие ядерно-физической медицины в Институте ядерных исследований РАН.” Успехи физических наук, т.180, № 6, 2010, с.665-670
2. Л.В.Кравчук и др. «Инновационные разработки и проекты Института ядерных исследований РАН», Вып.1, Сборник статей, ИЯИ РАН, М.,2009
3. Н.В. Куренков, Ю.Н. Шубин; Радионуклиды в ядерной медицине, (получение и использование), Обнинск; ФЭИ-1993г.
4. Под редакцией В.Ю.Баранова. Изотопы: свойства, получение, применение. В 2-х томах М. ФИЗМАТЛИТ, 2005.
5. V.L.Zhuikov. Production of new radionuclides for therapy on accelerators. 1st TARCC – Int. workshop on targeted radionuclide therapy “Advances in targeted radionuclide therapy”. May 25-26, 2009, Abstracts. Nantes, France, P.11.
6. Б.Л.Жуйков, С.Н.Калмыков, Р.А.Алиев, С.В.Ермолаев, В.М.Коханюк, Е.В.Лапшина, Н.А.Коняхин, И.Г.Тананаев, Б.Ф.Мясоедов. Получение актиния-225 и других радионуклидов медицинского назначения из тория, облученного ускоренными протонами. Шестая российская конференция по радиохимии - Радиохимия-2009, 12-16 октября 2009. Тезисы докладов. Москва, 2009, с. 353.
7. Б.Л.Жуйков, С.В.Ермолаев, В.М.Коханюк. Способ получения радиостронция. Патент РФ. №2356113, 27.03.2008, БИ №14 20.05.2009; PCT application PCT/RU2009/000124, Int. filing date 13.03.2009.
8. Б.Л.Жуйков, С.Сривастава, С.В.Ермолаев, Н.А.Коняхин, С.В.Хамьянов, Н.Р.Тогаева, В.М.Коханюк. Способ получения радиоолова в состоянии без носителя и мишень для его осуществления. Пат. РФ. № 2313838, 29.12.2006. Б.И. №36, 2007; U.S. Patent, Application No.11/962,851, Dec. 21, 2007.
9. S. V. Ermolaev, V.L. Zhuikov, V. M. Kokhanyuk, N.R.Togaeva, S.V.Khamianov, S.C.Srivastava. Production of no-carrier-added ^{117m}Sn from proton irradiated antimony. 2nd Int. Nucl. Chem. Congress, April 13-18, 2008, Cancun, Mexico. Abstract book. Ed. M. Navarrete. P.31. J. Radioanalyt. Nucl. Chem., v.280, N.2, p. 319-324, 2009.
10. S.V.Akulinichev, L.V.Kravchuk, V.A.Matveev “Progress and perspectives of INR Radiological Center”, Physics for Health in Europe Workshop, Feb.2010, CERN, Switzerland, Book of abstracts, p.80

11. B.L. Zhuikov, S. V. Ermolaev, V. M. Kokhanyuk. Adsorption of radionuclides from liquid metals. 2nd Int. Nucl. Chem. Congress, April 13-18, 2008, Cancun, Mexico. Abstract book. Ed. M. Navarrete. P.76.
12. В.П.Якушев, В.Н.Зубец, Е.С.Никулин, О.Т.Фролов.
Генератор стабильных импульсов высокого напряжения.
Приборы и техника эксперимента, №2, 2009, с.71-74.
13. С.Е.Брагин, И.А.Васильев, О.М.Володкевич, О.В.Грехов, Ю.В.Киселев, А.Н.Мирзоян, В.А.Моисеев, А.В.Фещенко. “Контроль и формирование пучка протонов линейного ускорителя ИЯИ РАН на мишени изотопного комплекса”. Вопросы атомной науки и техники, серия: Ядерно- физические исследования, Украина, Национальный научный центр “Харьковский физико-технический институт”, 2010, № 2 (66), с. 96-100
14. В.А.Гайдаш, Ю.Н.Готовцев, О.В.Грехов, В.В.Кузнецов, В.Н.Михайлов, В.Л.Серов, А.В.Фещенко, А.Н.Мирзоян. Канал инжекции ионов H⁺ линейного ускорителя ИЯИ РАН. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия “Ядерно-физические исследования”* (49). 2008, №3, с. 119-122.
15. S.E.Bragin, A.V.Feschchenko, O.V.Grekhov, N.F.Lebedeva, V.N.Mikhailov, A.N.Mirzojan, V.A.Moiseev, O.M.Volodkevich. Transverse Beam Matching and Correction Procedures in INR Linac. // *Proceedings of LINAC 2006*. Knoxville, Tennessee, USA, pp.435-437.
16. A.V.Feschchenko, “ Bunch Shape Monitors with RF Scanning of Lower Energy Secondary Electrons.” Report at 2nd DITANET Topical Workshop on Longitudinal Beam Profile Measurements. Manchester, 12-13 July 2010.