

На правах рукописи

ПАВЛОВ Олег Анатольевич

**КОНСТРУКЦИЯ ОСНОВНЫХ СИСТЕМ И
ЭЛЕМЕНТОВ ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННОГО
УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЛИУ-2**

01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

НОВОСИБИРСК – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

Шиянков Сергей Владимирович	– кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск
--------------------------------	--

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Дроздовский Александр Андреевич	– кандидат физ. – мат. наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики» НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, старший научный сотрудник
------------------------------------	--

Кравчук Леонид Владимирович	– доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва, директор института
--------------------------------	--

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ	– Федеральное государственное бюджетное учреждение «ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий» НИЦ «Курчатовский институт», г. Протвино
--------------------------------	--

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2015 г. в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.01 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И.Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Автореферат разослан «_____» _____ 2015 г

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

А.В. Бурдаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из важнейших областей применения мощных импульсных источников рентгеновского излучения является исследование баллистических и быстротекущих процессов в больших толщинах тяжелых металлов. В этом случае в рентгеновских лучах можно наблюдать как процессы детонации и горения взрывчатых веществ, так и работу ядерного боеприпаса на газодинамической стадии. Такие исследования необходимы для развития ядерного оружия без проведения натурных ядерных испытаний. Для целей рентгеновской томографии в мире построено несколько больших (с энергией более 10 МэВ) индукционных ускорителей (ЛИУ): в США – FXR, DARHT-I и DARHT-II, во Франции – AIRIX и в КНР – DRAGON. Параметры этих ускорителей: ток пучка от 2,5 кА до 3,5 кА, энергия пучка от 17 МэВ до 20 МэВ. Фокусное пятно пучка, получаемое в установках от 1.5 до 3 мм.

В России для этих исследований достаточно давно применяется бетатрон БИМ, который не обеспечивает ускорение сильноточных пучков и имеет поперечный размер больше чем у ЛИУ. Поэтому около 10 лет назад было принято решение о разработке линейного индукционного ускорителя электронов для импульсной рентгенографии.

Цель работы

Расчет элементов электронно-оптической системы и разработка конструкции и технологии изготовления основных узлов и систем ускорителя ЛИУ-2. Этот ускоритель должен стать прототипом инжектора для проектируемого линейного индукционного ускорителя с энергией 20 МэВ.

Личный вклад

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Им непосредственно спроектирована электронно-оптическая система и выполнен расчет элементов системы, обеспечивающий точность сборки, разработана конструкция индукторов ускорителя, конструкция элементов системы диагностики и фокусировки пучка, конструкция зарядного устройства, конструкция модулятора на базе пленочных диэлектриков, разработана общая схема сборки ускорителя.

Научная новизна

Впервые в отечественной практике была разработана конструкция электронно-оптической системы со следующими важнейшими параметрами: электростатическая компрессия – 5, магнитная компрессия – 1600.

Разработанная конструкция обеспечила получение пучка с плотностью электронов – 10^5 А/см² и рекордным для энергии 1.7 МэВ поперечным размером менее 2 мм.

Практическая ценность результатов

Результаты работ, описанных в диссертации, позволили построить первый в России линейный индукционный ускоритель, способный работать в составе комплекса для импульсной рентгенографии. Предложенные конструктивные решения обеспечили точность сборки, что позволило получить требуемые параметры ускорителя.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Расчет элементов конструкции электронно-оптической системы,
2. Разработка конструкции и технологии изготовления основных узлов и систем линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах, на российских и международных научных и научно-практических конференциях: на международной научной конференции по ускорителям заряженных частиц International Particle Accelerator Conference (IPAC'2011), San Sebastian, Spain, 4 – 9 September 2011, на XI Международной конференции «Забабахинские научные чтения», Снежинск, Россия, 16-20 апреля 2012 и на XI Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П. Саранцева, Алушта, Россия, 7-15 сентября 2015. Результаты диссертации опубликованы в двух рецензируемых научных журналах.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения, списка литературы из 14 наименований и 16 приложений, изложена на 92 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка и 2 таблицы,

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении поясняется необходимость создания сильноточной рентгенографической установки с энергией до нескольких мега-электрон-вольт откуда следует вывод об актуальности работы. Здесь же приведены параметры инжекторов зарубежных установок, используемых для рентгеновской томографии.

В первой главе описан общий состав ЛИУ-2, показано расположение основных систем и элементов ускорителя и приведены основные параметры.

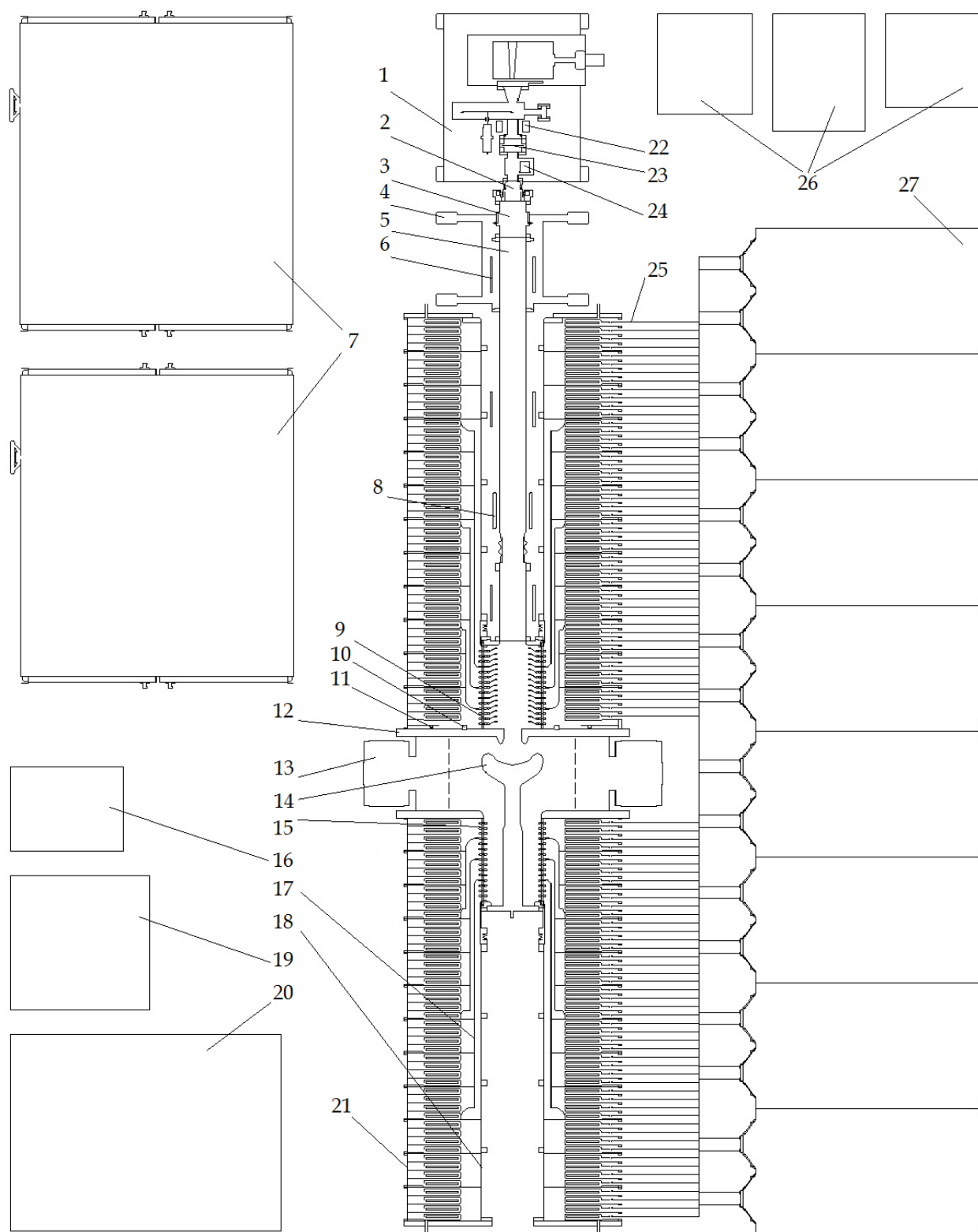


Рис. 1. Общая схема ЛИУ-2.

1- Мишенный узел, 2- Трансформатор тока на входе в мишенный узел, 3- Датчик положения пучка, 4- Опора вакуумной камеры, 5- Вакуумная камера, 6- Линза 1, 7- Устройство зарядное, 8- Корректор, 9- Вторая ускорительная трубка, 10- Трансформатор тока на выходе пучка из анода, 11- Корректирующая катушка, 12- Центральный корпус с анодом,

13- Магниторазрядный вакуумный насос, 14- Катодный узел, 15- Первая ускорительная трубка, 16- Вакуумный пост откачки на форвакуум, 17- Электрод, 18- Внутренний кожух, 19- Система подачи воды, 20- Система подачи газа, 21- Корпус индукторов, 22- Линза 2, 23- Шиббер, 24- Узел координатный, 25- Кабель, 26- Стойки управления, 27- Стойки модуляторов.

Таблица 1. Основные параметры ЛИУ-2

Максимальное ускоряющее напряжение, МВ	2.0
Максимальный ток пучка, кА	2.0
Количество последовательных импульсов	2
Временной интервал между импульсами, мкс	2 -30
Размер электронного пучка на мишени (ширина на полувысоте) – не более (во всех режимах), мм	2
Длительность импульса тока по полочке ($\pm 4\%$), нс	200
Угол выхода излучения, формируемый коллиматором, рад	0.1
Среднее количество рабочих выстрелов по пластинам мишени до их полной замены.	150
Максимальная частота повторения импульсов ускорителя в режиме непрерывной работы, Гц	0.1
Длина (без систем питания и управления), м	7,3

Во второй главе работы выполнен расчет конструкции, описаны особенности и основные этапы изготовления электронно-оптической системы: анода, катодного узла и ускорительных трубок.

Для формирования пучка электронов в инжекторе используется двухступенчатая электронно-оптическая система (ЭОС) с общим напряжением 2 МВ, представленная на Рис. 2.

Первая ступень – сферический диод с катодом диаметром 180 мм и радиусом сферы 190 мм, к которому приложено напряжение 1 МВ относительно анода, установленного в центральном корпусе. Катод крепится на катодном держателе, через который подается напряжение к катоду. Катодный держатель устанавливается на ускоряющей трубке, представляющей собой секционированный проходной высоковольтный изолятор сверхвысоковакуумного исполнения. Второй МэВ пучок приобретает, пролетая вторую ускорительную трубку.

Ускорительные трубки присоединены с одной стороны к стенкам центрального корпуса (глава 3) с другой к внутреннему кожуху (глава 4). Снаружи на ускорительных трубках установлены разъемы для крепления выравнивающих экранов (глава 5).

Окончательный вариант катода был выбран после электронно-оптических расчетов с целью достижения минимального эмиттанса пучка. КERN катода инжектора ЛИУ изготовлен из листа молибдена толщиной 2 мм методом штамповки, с последующим отжигом в среде водорода при

температуре 900 °С. На него наносится слой вольфрамовой губки, который затем спекается и обрабатывается в размер радиуса сферы 190 мм.

Применение в конструкции катода большого размера потребовало решения ряда проблем, а именно:

- освоение изготовления вакуумноплотных высокоточных металлокерамических узлов больших размеров с использованием фланцев ConFlat нестандартных размеров;
- большие размеры внутреннего и, соответственно, наружного диаметров индукторов инжектора потребовали изготовления дополнительной оснастки для сборки индукторов.
- увеличение размеров индукторов вызвало увеличение длины средней линии их сердечников и, соответственно, тока намагничивания, электрически нагружающего элементы модулятора.

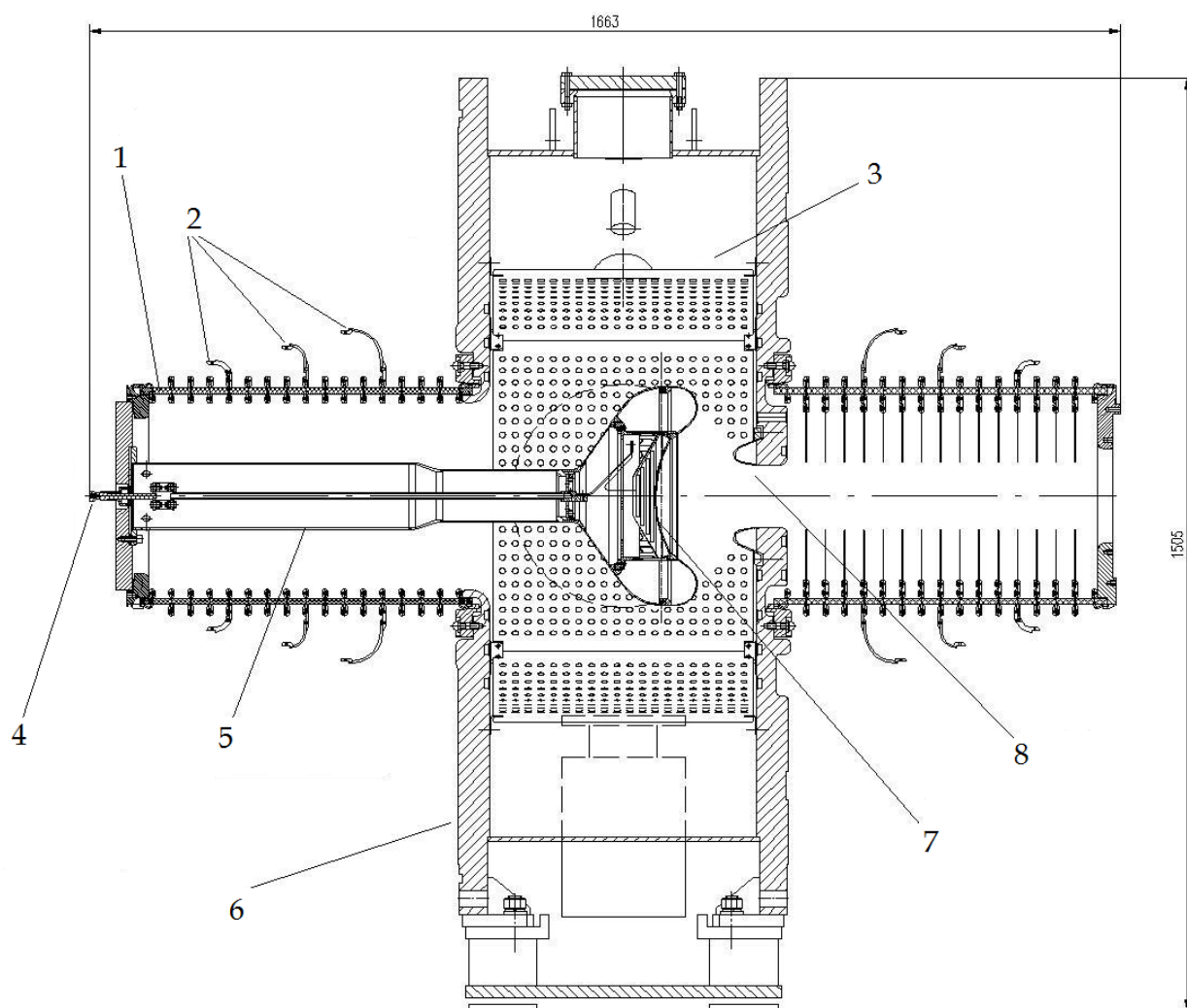


Рис. 2. ЭОС инжектора ЛИУ-2

1- Первая ускорительная трубка 1 МВ, 2- Разъемы для выравнивающих электродов, 3- Экран, 4- Подвод питания для нагревателя катода, 5- Катодный держатель, 6- Центральный корпус, 7- Катод, 8- Анод, 9- Вторая ускорительная трубка

Размер катодного держателя (Рис. 3): длина 980 мм, диаметр 354 мм. Точная выставка держателя производится без прикатодных электродов, поэтому была необходимость расчёта положения держателя при выставке и после установки катода. Расчет производился способом Верещагина, который позволяет определять перемещения для бруса, состоящего из прямых участков с постоянной в пределах каждого участка жесткостью. Вычисления показали, что после установки электродов положение катода по отношению к аноду изменится менее чем на 0.1 мм, что удовлетворяет электронно-оптическим расчетам.

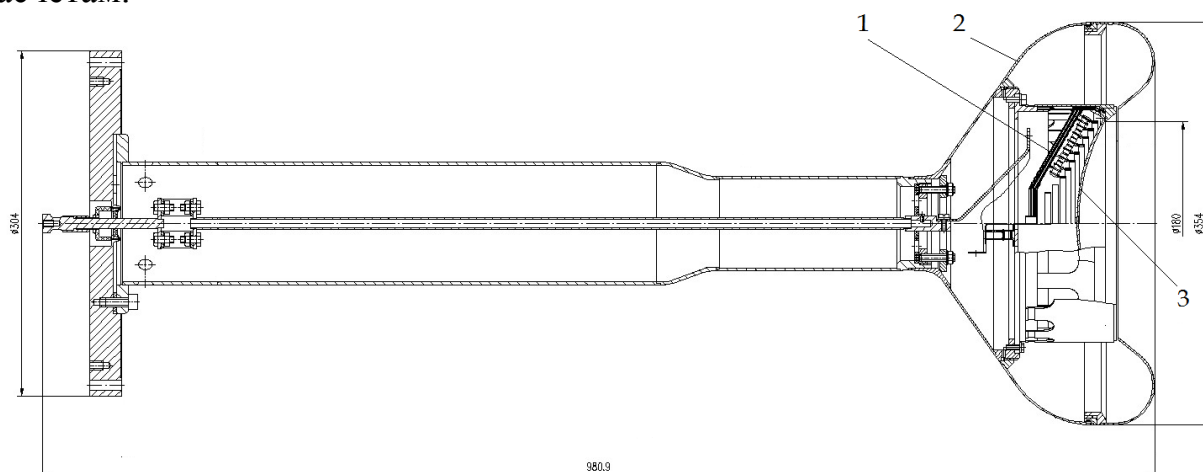


Рис. 3. Катодный держатель в сборе с катодным узлом и электродами.
1- Нагревательный элемент катода, 2- Прикатодные электроды, 3- Катод

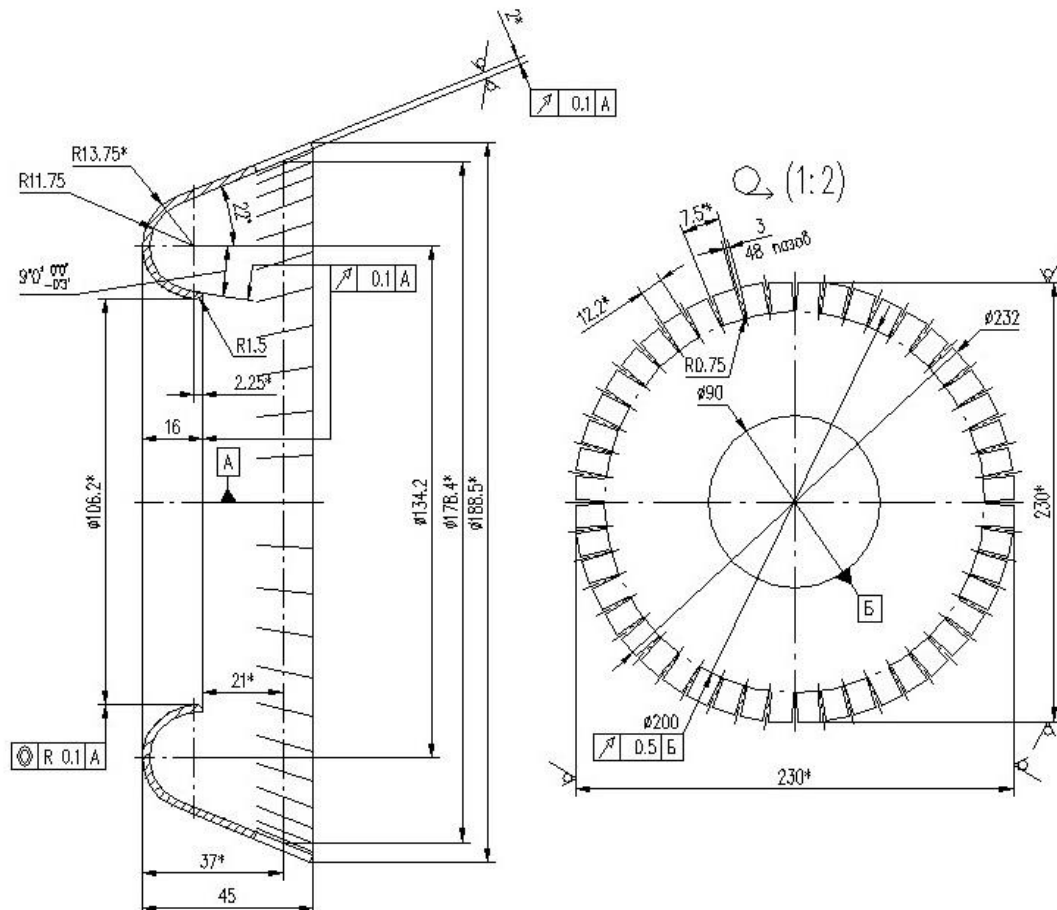


Рис. 4. Анод ЛИУ-2

Анод (Рис. 4) изготовлен из листа молибдена толщиной 2 мм методом выдавливания с последующей обработкой сферы и посадочной поверхности для установки в корпусе катодного держателя. Оборудование ИЯФ не позволило выполнить анод с рассчитанным профилем. Поэтому пришлось сделать пазы для формования посадочной поверхности и убрать внутренний конус, который был заменен съемной деталью.

Надежность работы всего ускорителя определяется, в том числе надежностью ускорительных трубок (Рис.5), которые изготавливаются из керамических колец и медных электродов, спаянных между собой.

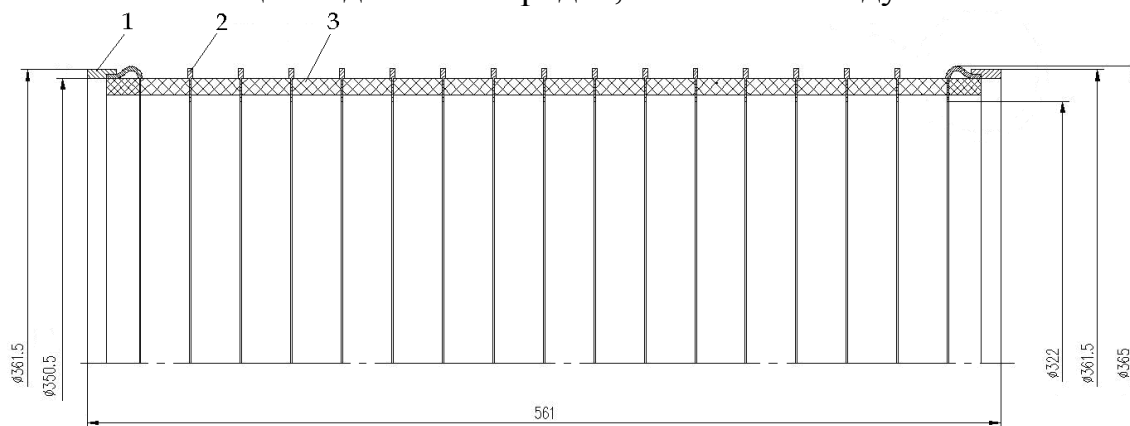


Рис. 5. Секционированный проходной высоковольтный изолятор
сверхвысоковакуумного исполнения

1- Биметаллический электрод, 2- Медный электрод, 3- Керамическое кольцо

Для сварки фланцев на концах ускорительных трубок припаяны биметаллические электроды, состоящие из медной манжеты и кольца изготовленного из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Манжета изготовлена из меди М0б. Для пайки нержавеющей стали и меди в биметаллическом электроде использовался припой Niго (82% Au и 18% Ni) при температуре пайки 1000 °С. Для пайки медных электродов и керамических колец применялся припой ПСр-72.

После пайки были приварены фланцы. Перед сваркой был произведен контроль соосности манжет секционированного изолятора. Соосность после пайки была 1 мм. Выставка фланцев до сварки и контроль после сварки производились на координатно-измерительной машине CONTURA G2 фирмы ZEISS. Соосность фланцев после сварки составила 0.15 мм. Для выставки фланцев на секционированном изоляторе использовалось специальное приспособление.

Ускорительные трубки крепятся к центральному корпусу на высоковакуумное прогревное соединение (ConFlat) нестандартного исполнения с условным диаметром прохода 387мм. С одной стороны центрального корпуса устанавливается ускорительная трубка первой ускорительной части, с другой стороны ускорительная трубка второй ускорительной части инжектора (Рис. 6). Фланцы ускорительных трубок для крепления к центральному корпусу выполнены с одинаковыми диаметрами.

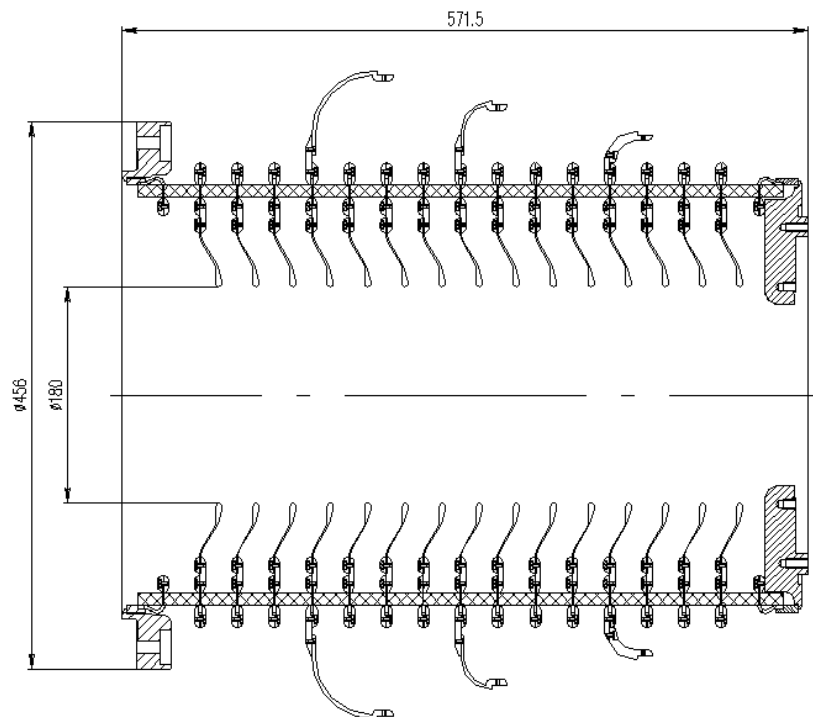


Рис. 6. Ускорительная трубка второй ускорительной части

Внутри и снаружи ускорительных трубок устанавливаются электроды. Форма электродов внутри ускорительной трубки на выходе пучка имеет сложную форму с переменной толщиной для уменьшения напряжения возникающего от собственного поля пучка.

Каждое наружное кольцо обоих керамических изоляторов шунтировано резисторами для обеспечения утечки заряда, возникающего на них во время формирования пучка либо за счет токооседания самого пучка, либо за счет автоэмиссионных процессов в проходном изоляторе вакуумного диода.

В третьей главе освещены вопросы, относящиеся к центральному корпусу ЛИУ-2. Элементы электронно-оптической системы ускорителя монтируются на центральном корпусе (Рис. 7). Корпус, описанный в первой части, представляет собой вакуумный объем из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, который установлен на отдельной опоре. Внутри корпуса предусмотрены крепления для разборного экрана. В обечайке корпуса расположены окна диаметром 300 мм для выставки катодного держателя по отношению к аноду, а также монтажа катода, прикатодных электродов и экрана. Диаметр окон позволяет осуществлять выставку катодного держателя соосно с анодным отверстием центрального корпуса и монтаж прикатодных электродов, а так же последующую установку экрана.

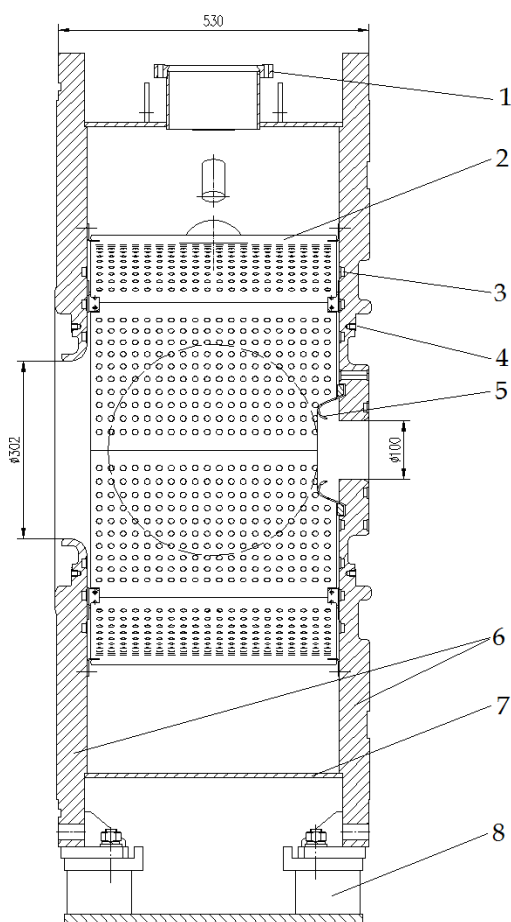


Рис.7. Центральный корпус ЛИУ-2

1- Фланец для магниторазрядного насоса, 2- Экран, 3- Каналы охлаждения, 4- Посадочное место ускорительной трубки, 5- Анод, 6- Стенки корпуса, 7- Обечайка корпуса, 8- Опора

Для отвода избыточного тепла в стенках центрального корпуса предусмотрены каналы охлаждения. Вторая часть третьей главы посвящена опоре корпуса для выставки положения корпуса по отношению к объекту исследования. Третья часть рассматривает конструкцию экрана, устанавливаемого внутри корпуса.

В четвертой главе описана конструкция вакуумной камеры. Первая часть посвящена самой камере, а вторая опоре, при помощи которой выставляется ось камеры относительно второй ускорительной трубки и мишенного узла. Внутренний диаметр вакуумной камеры 151 мм. Камера состоит из двух частей с сильфонным узлом. Внутренний диаметр второй части камеры длиной 1736,5 мм обрабатывали с двух сторон. Рассчитанный прогиб камеры под нагрузкой составляет 0.15 мм, что находится в допуске на прямолинейность камеры.

Пятая глава посвящена системе фокусировки пучка (Рис. 8). В первой части представлена конструкция линзы тип 1, установленной на вакуумной

камере. Во второй части описана линза тип 2. Третья часть описывает корректор. Четвертая часть рассматривает корректирующую катушку. Оба типа линз специальный дизайн, для того чтобы максимально уменьшить величину сферической аберрации пучка.

Соосность системы фокусировки с осью пучка электронов обеспечивается точностью обработки посадочных мест элементов системы.

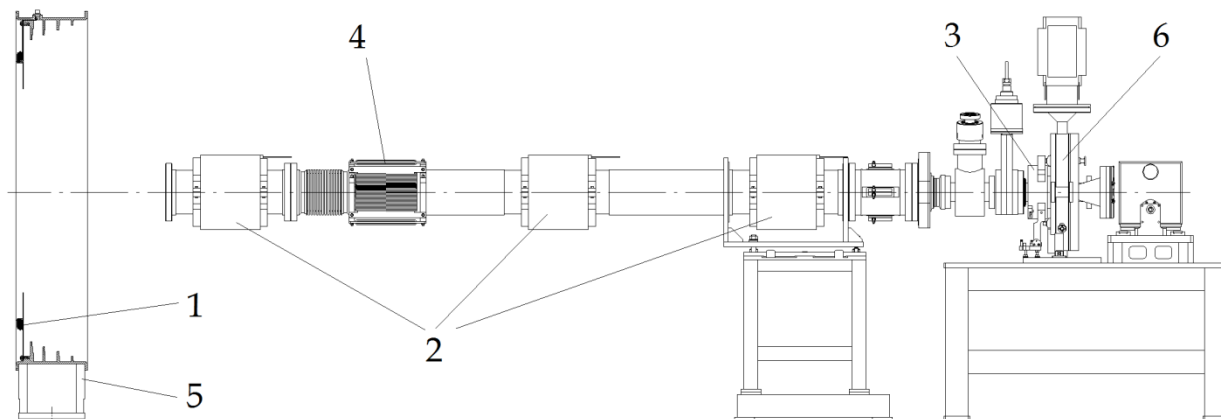


Рис.8. Элементы фокусировки пучка

1- Корректирующая катушка, 2- Линза тип 1, 3- Линза тип 2, 4- Корректор, 5- Корпус индукторов, 6- Мишенный узел

Шестая глава работы посвящена конструкции индуктора, электродов и газовых объемов импульсного трансформатора.

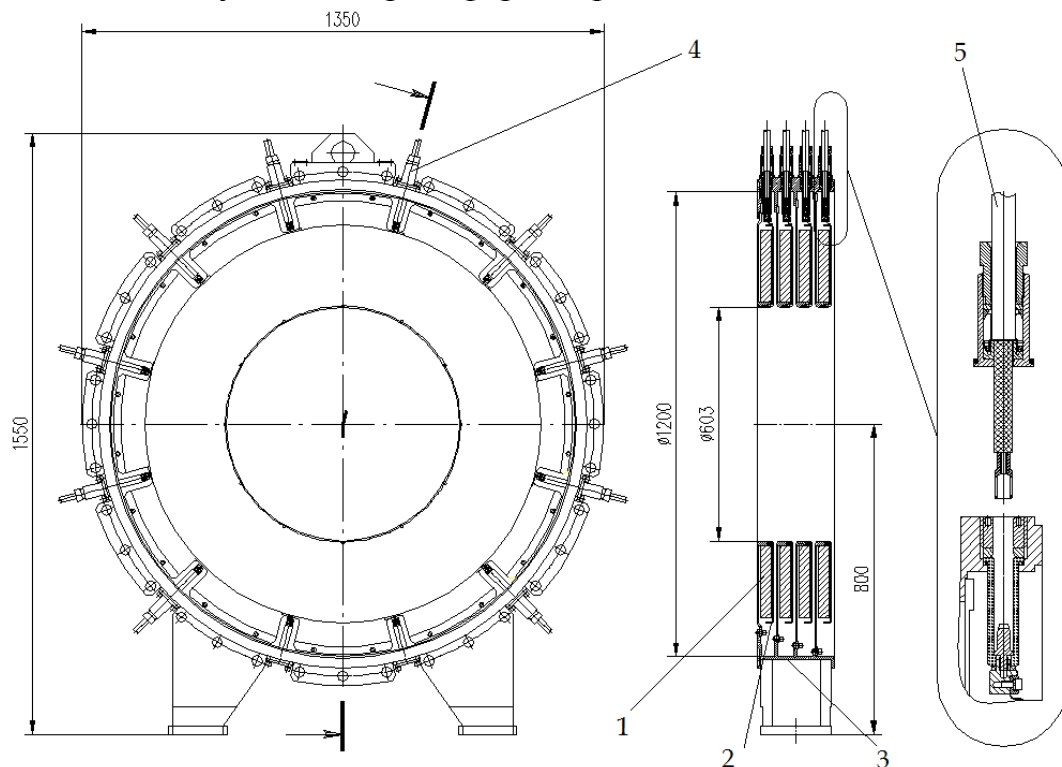


Рис.9. Индукторы в корпусе

1- Индуктор, 2- Кожух индуктора, 3- Корпус индуктора, 4- Разъем 50 Ом, 5- Кабель

Индукторы, изготовленные из аморфного железа сплав 2НСР, разбиты по группам, состоящим из 4 индукторов. Группа индукторов размещается в отдельном корпусе (Рис. 9). В корпусе каждый индуктор имеет кожух с посадочным местом своего типоразмера.

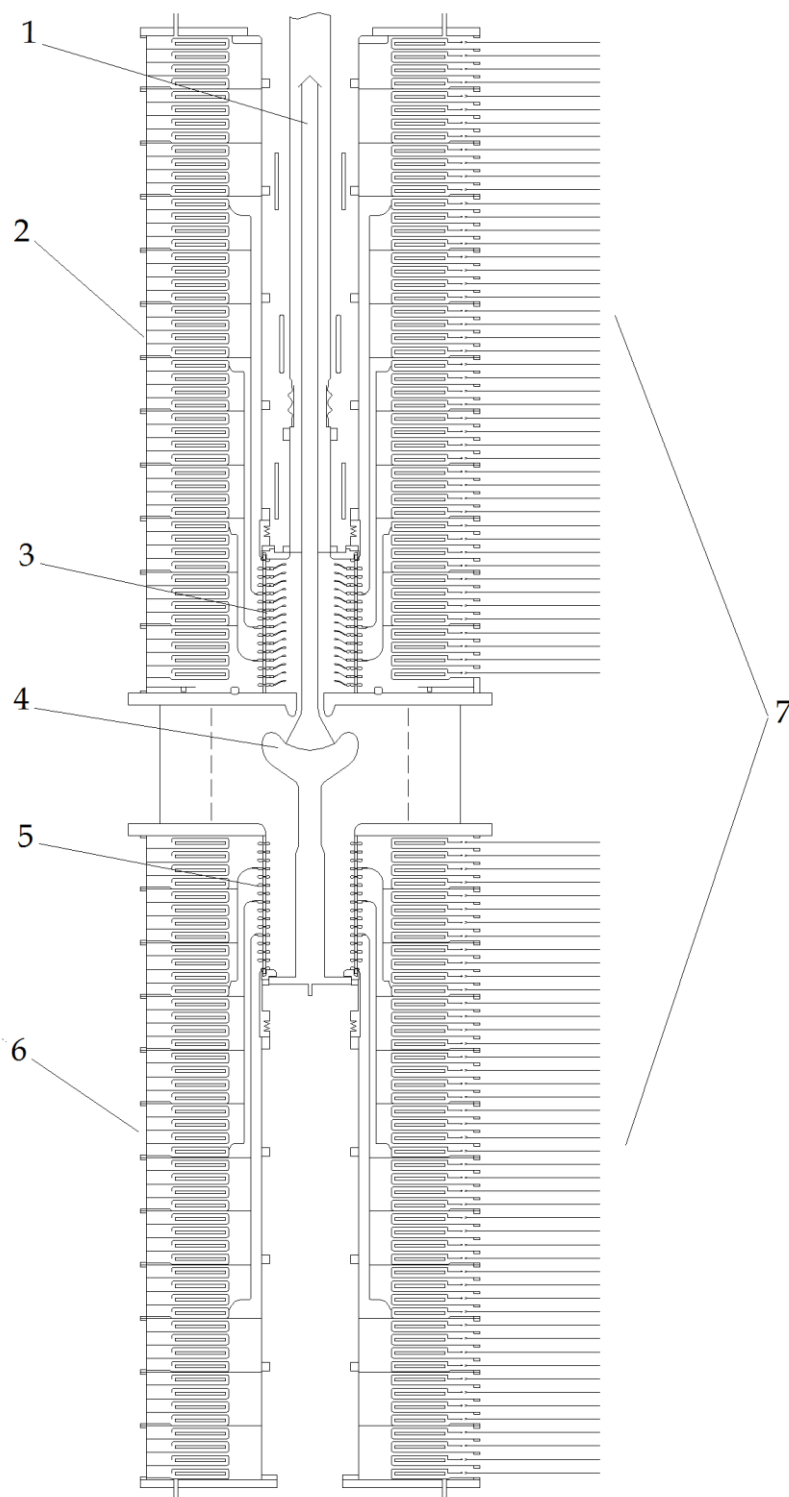


Рис. 10. Общая схема сборки индукторов

1- Пучок электронов, 2- Вторая секция индукторов, 3- Вторая ускорительная трубка, 4- Катодный держатель с катодом и прикатодными электродами, 5- Первая ускорительная трубка, 6- Первая секция индукторов, 7- Кабельная система, идущая от модуляторов

Каждый кожух индуктора имеет 12 высоковольтных вводов сопротивлением 50 Ом расположенных равномерно по азимуту, 10 из них используются для подключения к индуктору питающих высоковольтных кабелей. Один ввод задействован для подключения измерительного делителя и еще один остается в резерве. Всего в инжекторе 1152 разъема. Все разъемы герметичные, поскольку внутренний объем корпуса заполнен элегазом под давлением 0.7 ати. Подвод питания осуществляется через 960 разъемов 50-Омным кабелем РК-50 11/13 равной длины для обеспечения согласования с волновым сопротивлением нагрузки.

Все корпуса собраны в две секции, общая схема сборки индукторов показана на Рис. 10. Для выравнивания продольного градиента напряжения вдоль изоляторов и устранения эффекта полного напряжения в обеих половинах инжектора используются электроды, соединяющие индуктор с соответствующим электродом секционированного изолятора ускоряющей трубки. Электроды выполнены из нержавеющей стали толщиной 0.5 мм с максимальным диаметром 440 мм и длиной 1330 мм. На электродах по всей длине сделан сплошной сварной шов. Для обеспечения электрической прочности индукторной системы обе ее части выполнены герметично и заполнены элегазом. Заполнение элегазом объемов индукторных модулей обеспечивается через вентили, установленные на торцевых фланцах крайних индукторных модулей.

Седьмая глава посвящена разработке элементов системы диагностики. Описываются датчик положения пучка, трансформаторы тока и координатный узел. Ток пучка измеряется двумя импульсными трансформаторами тока. Первый из них расположен в первой секции второй ускоряющей трубки. Второй трансформатор расположен на входе в мишенный узел. Временная зависимость поперечного положения и тока пучка измеряется посредством широкополосного полоскового датчика непосредственно на входе в мишенный узел. Сразу за датчиком расположен координатный узел - цилиндр Фарадея, который может перекрывать и полностью поглощать электронный пучок, измеряя при этом полный заряд пучка за импульс. Предусмотрено также измерение напряжения на индукторах.

Восьмая глава посвящена мишенному узлу (Рис.11), конструкциям привода колеса с мишенными пластинами и устройства выставки корпуса. Мишенный узел отделен от инжектора вакуумным шиббером и имеет собственную независимую систему вакуумной откачки, что необходимо для регулярной замены мишенных пластин без нарушения высокого вакуума в электронно-оптической системе ускорителя. Узел так же способен штатно принять внутри себя интенсивный электронный пучок при отсутствии мишени.

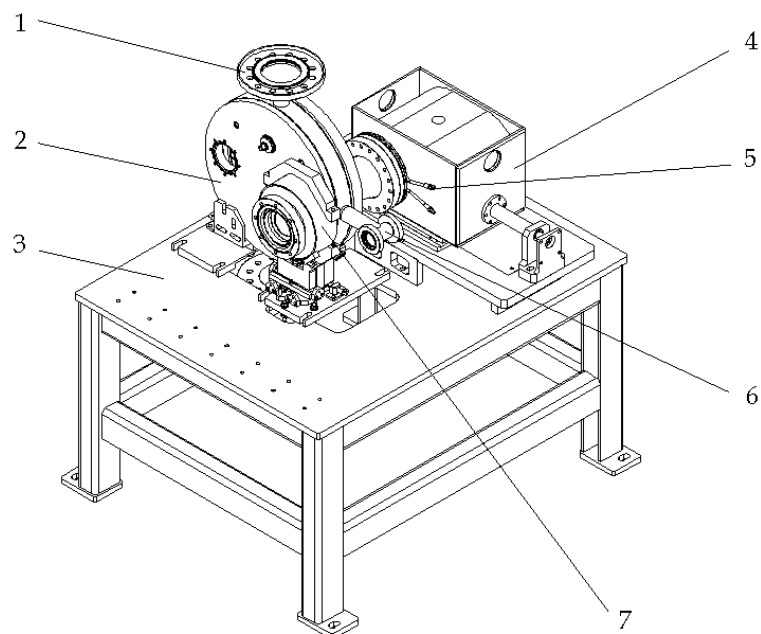


Рис. 11. Мишенный узел

1- Патрубок для вакуумного насоса, 2- Корпус, 3- Опора, 4- Коллиматор, 5- Подвод охлаждения, 6- Патрубок для подсоединения видеокамеры, 7- Линза фокусирующая тип 2

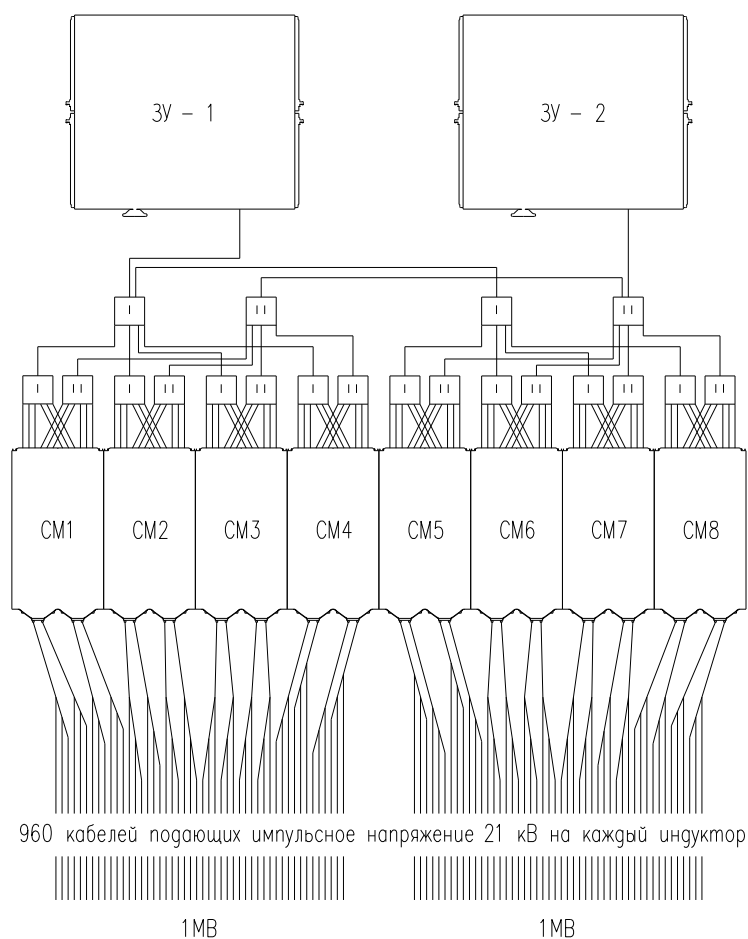


Рис. 12. Импульсная система высоковольтного питания

В девятой главе описана конструкция элементов системы питания инжектора (Рис. 12). С целью снижения требований к высоковольтной прочности импульсная система разделена на несколько унифицированных импульсных блоков - модуляторов. Каждый модулятор способен работать независимо и формировать на своей нагрузке (индукторе) импульсы требуемой формы. Модуляторы устанавливаются в специальную стойку (СМ), рассчитанную на шесть модуляторов в три этажа. Всего используется 8 стоек. Каждое зарядное устройство (ЗУ) соединяется с нужной группой модуляторов через один высоковольтный кабель и систему разветвления зарядного тока, расположенную на стойках модуляторов.

В заключении приводятся основные результаты работы, состоящие в следующем:

1. Разработана общая структура инжектора для ускорителя ЛИУ-20.
2. Выполнена конструкторская разработка основных систем и элементов ускорителя ЛИУ-2.
3. Сделаны расчеты подтверждающие работоспособность конструкции катодной части электронно-оптической системы.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. P. Logachev, O. Pavlov et al. // Performance of 2 MeV, 2 kA, 200 ns linear induction accelerator with Ultra low beam emittance for X-ray flash radiography. // IPAC 2011, San Sebastian, Spain, 4 – 9 September 2011 <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2011/papers/weoaa02.pdf>
2. А.Р. Ахметов, О.А. Никитин, П.В. Логачев, О.А. Павлов и др. // Измерение параметров электронного пучка в инжекторе ЛИУ (ЛИУ-2). // XI Международная конференция «Забабахинские научные чтения», Снежинск, Россия, 16-20 апреля 2012
3. М.Ю. Столбиков, О.А. Никитин, А.Р. Ахметов, П.В. Логачев, О.А. Павлов и др. // Подготовка и проведение рентгенографических экспериментов на инжекторе ЛИУ (ЛИУ-2). // XI Международная конференция «Забабахинские научные чтения», Снежинск, Россия, 16-20 апреля 2012
4. П.В. Логачев, Г.И. Кузнецов, А.А. Корепанов, А.В. Акимов, С.В. Шиянков, О.А. Павлов, Д.А. Старостенко, Г.А. Фаткин // Линейный индукционный ускоритель ЛИУ-2. ПТЭ, 2013, №6, с. 42-49.
5. Д.А. Старостенко, П.В. Логачев, А.В. Акимов, А.А. Корепанов, П.А. Бак, А.Н. Панов, О.А. Павлов и др. // Результаты работы ЛИУ-2 в рентгенографическом режиме. // Письма в ЭЧАЯ, 2014, Т.11, №5(189), с. 1022-1028.
6. Д.А. Старостенко, П.В. Логачев, О.А. Павлов, О.А. Никитин, Д.В. Петров и др. // Статус ЛИУ-2. Двухимпульсный режим. // XI Международный семинар по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П. Саранцева, Алушта, Россия, 7-15 сентября 2015.

ПАВЛОВ Олег Анатольевич

**Конструкция основных систем и элементов
линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-2**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук