

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
Шиянков Сергей Владимирович

НОВОСИБИРСК – 2015

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. Схема устройства ЛИУ-2	8
ГЛАВА 2. Электронно-оптическая система	11
2.1. Катод	13
2.2. Анод	21
2.3. Ускорительная трубка	22
ГЛАВА 3. Центральный корпус	28
3.1. Корпус	29
3.2. Опора корпуса	31
3.3. Экран	32
ГЛАВА 4. Вакуумная камера	35
4.1. Камера	36
4.2. Опора	37
ГЛАВА 5. Система фокусировки пучка	39
5.1. Линза тип 1	40
5.2. Линза тип 2	41
5.3. Корректор	42
5.4. Корректирующая катушка	42
ГЛАВА 6. Индукторы импульсного трансформатора	44
6.1. Индуктор	46
6.2. Кожух индуктора	50
6.3. Корпус индуктора	52
ГЛАВА 7. Система измерений параметров пучка	56
7.1. Датчик положения пучка	56
7.2. Трансформатор тока	59
7.3. Узел координатный	62

7.4.	Делители напряжения индукторов	64
7.5.	Емкостной делитель напряжения в вакуумном диоде	65
ГЛАВА 8. Мишенный узел		69
8.1.	Корпус	70
8.2.	Коллиматор	71
8.3.	Опора	72
ГЛАВА 9. Импульсная система высоковольтного питания		73
9.1.	Модуляторы	75
9.2.	Зарядное устройство	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		80
ЛИТЕРАТУРА		81
ПРИЛОЖЕНИЯ		83

Введение

Наиболее важное применение мощных импульсных источников рентгеновского излучения относится к области исследования баллистических и быстропротекающих 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 натуральных ядерных испытаний. Для целей рентгеновской томографии в мире построено несколько больших (с энергией более 10 МэВ) индукционных ускорителей: в США – FXR, DARHT-I и DARHT-II, во Франции – AIRIX и в КНР – DRAGON [1].

Первой мощной рентгенографической установкой был линейный индукционный ускоритель (ЛИУ) FXR – энергия пучка 17 МэВ, ток пучка 3 кА, фокусное пятно пучка 3,5 мм. ЛИУ FXR был построен в Ливерморской национальной лаборатории в 1980 году. Инжектор ускорителя состоял из шести индукционных модулей, создающих потенциал 1.2 МэВ. Четыре модуля по 200 кВ создавали напряжение, подаваемое к катоду, и два модуля были подключены со стороны анода. Ток пучка инжектора 2.2 кА. В дальнейшем была проведена модернизация, которая заключалась в увеличении количества индукционных модулей и создании системы питания для двух-импульсной работы инжектора. Параметры после модернизации инжектора FXR: энергия пучка 2.5 МэВ, ток пучка 3 кА [2].

Часто возникает потребность одновременного наблюдения объекта исследования в разных ракурсах. В США в комплексе DARHT используется два взаимно перпендикулярных ЛИУ для получения интенсивных импульсов рентгеновского излучения для скоростной рентгеновской съемки.

Первый этап работы DARHT-I (1999 г.) – получение одиночного импульса с энергией 19.8 МэВ, током пучка 2 или 4 кА, фокусное пятно пучка 2 мм. Параметры инжектора DARHT-I: энергия пучка – 4 МэВ; ток пучка с «вельветовыми» катодами 64 мм – 2 кА / 90 мм – 4 кА [3, 4].

Второй этап DARHT-II (2003 г.) – энергия пучка 20 МэВ, ток пучка 2 кА, фокусное пятно пучка 2.1 мм. Электронный пучок, формируемый инжектором, проходит коллиматор пучка, освобождаясь от заряда, полученного на фронте импульса, и далее ускоряется с помощью секций индукторов, питаемых от формирующих линий, до энергии 20 МэВ. При прохождении пучка через кикер из него вырезаются четыре коротких импульса, направляемых непосредственно на рентгеновскую мишень-конвертер. В результате рентгеновское изображение будет фиксировать 4 изображения объекта.

Инжектор DARHT-II выполнен на основе генератора Маркса. Генератор помещен в кожух, заполненный изнутри элегазом под давлением. Питание цепи накала (1.5 кВт) и соленоида в районе катода (общая мощность в пределах 3 кВт), жидкостное охлаждение, а также передача сигналов управления осуществляется по тоководу, расположенному коаксиально внутри проходного изолятора, представляющего собой колонну высотой 4.44 м и диаметром 1.3 м. Колонна изнутри заполнена минеральным маслом. Наружная изоляция между колонной и котлом генератора диаметром 4 м и высотой 9 м обеспечивается за счет высокого вакуума не хуже $5 \cdot 10^{-8}$ торр. Катод – диспенсорного типа диаметром 165 мм с полированным фокусирующим электродом [3, 4]. Генератор Маркса формирует импульс тока амплитудой до 2 кА, длительностью на полке 2 мкс, напряжением 3,2 МВ и фронтом в пределах 500 нс.

Во Франции в В3-М/РЕМ (Institute at Pontfaverger - Moronvilliers) запущен линейный индукционный ускоритель AIRIX (1999 г.) - энергия пучка 20 МэВ, ток пучка 3,5 кА, фокусное пятно пучка 2 мм. [5]. Прототипом

инжектора ЛИУ AIRIX был инжектор ЛИУ PIVAIR (1994 г.), разработанный в CESTA (Centre d'Etudes Scien. et techniques d'Aquitaine, Le Barp) [6]. Конструкция инжекторов PIVAIR и AIRIX аналогична конструкции инжектора DARHT-I [3].

Инжектор AIRIX длиной 18 м состоит из конденсатора, заряжающего через импульсный повышающий трансформатор параллельно три двойные формирующие линии до напряжения 1.5 МВ. С помощью четырехканальных разрядников с лазерным запуском линии включаются последовательно на диод. Суммарное напряжение на диоде составляет 4 МВ. «Вельветовый» катод диаметром 89 мм обеспечивает ток пучка в пределах 3.5 кА при напряжении 4 МВ и длительности импульса 60 нс [6].

В настоящее время ускоритель демонтируется для использования в новом проекте EPURE [7]. Проект EPURE предполагает исследование объекта в трех ракурсах [8].

В Китае в CAEP (China Academy of Engineering Physics) спроектирован и построен ускоритель DRAGON-I (2003 г.) - энергия пучка 20 МэВ, ток пучка 2,5 кА, фокусное пятно пучка 1.5 мм [9]. Ускоритель состоит из инжектора 3.6 МэВ, 72 индукционных ячеек и 18 многофункциональных обмоток. В инжекторе используется «вельветовый» катод диаметром 70 мм на который подается напряжение 2.1 МВ.

Для решения задач по импульсной рентгенографии в России было решено создать линейный индукционный ускоритель, подобный зарубежным ЛИУ, представленным ранее. Работы по разработке начались с проектирования, изготовления и испытаний инжектора ЛИУ. Автору диссертации в конце 2006 года была поручена разработка конструкторской документации на инжектор. Разработка началась с создания конструкции прототипа импульсного трансформатора. В 2009 году в основном разработка конструкторской документации была закончена. В 2010 году ЛИУ-2 был

собран в ИЯФ и испытан на максимальных параметрах пучка. В 2012 году ускоритель был запущен в эксплуатацию в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ». Трудность разработки ЛИУ-2 была обусловлена отсутствием опыта проектирования подобных установок в ИЯФ и небольшим объемом информации о конструкции больших индукционных ускорителях.

На защиту выносятся следующие её положения:

- расчет элементов конструкции электронно-оптической системы,
- разработка конструкции и технологии изготовления основных узлов и систем линейного индукционного ускорителя ЛИУ-2.

ГЛАВА 1

Схема устройства ЛИУ-2

ЛИУ-2 является прототипом инжектора большого линейного индукционного ускорителя с конечной энергией электронного пучка 20 МэВ, предназначенного для малоракурсной рентгеновской томографии. В результате полученной большой интенсивности формируемого электронного пучка ЛИУ-2 может работать в качестве самостоятельной рентгенографической машины для газодинамической отработки изделий с большими толщинами тяжелых металлов. Для регистрации развития быстропротекающего процесса во времени ускоритель может формировать два одинаковых импульса тока с интервалом в несколько микросекунд. В таблице 1 приведены основные параметры ЛИУ-2.

Таблица 1

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

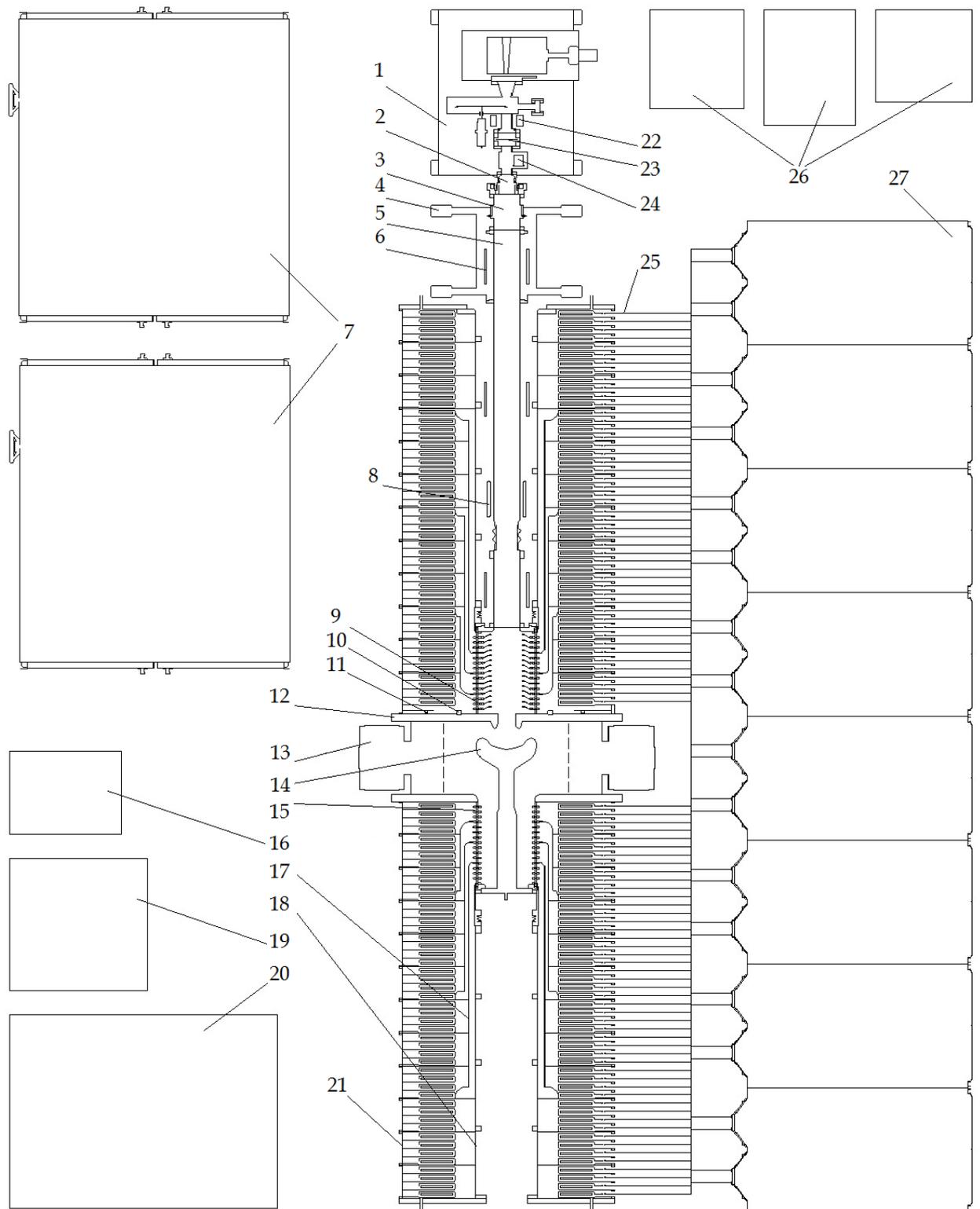


Рис. 1. Общая схема ЛИУ-2

1- Мишенный узел, 2- Трансформатор тока на входе в мишенный узел, 3- Датчик положения пучка, 4- Опора вакуумной камеры, 5- Вакуумная камера, 6-

Линза тип 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 тип 2, 23- Шиббер, 24- Узел координатный, 25- Кабель, 26- Стойки управления, 27- Стойки модуляторов.

На Рис. 1 показана общая схема ускорителя. ЛИУ-2 состоит из электронно-оптической системы (9,12,14,15), системы фокусировки пучка электронов (6,8,11,22), системы диагностики пучка (2,3,10,24), мишенного узла (1), ускоряющей системы (17,18,21) и источника импульсного напряжения (7,27), подаваемого на ускоряющую систему. Ускоряющая система фактически представляет собой импульсный трансформатор. Основная задача источника импульсного напряжения заключается в формировании прямоугольного импульса ускоряющего напряжения, приложенного к пучку, являющемуся вторичной обмоткой. Электроны приобретают энергию, последовательно проходя через электрические поля вихревого типа, формируемые между электродами ускорительной трубки.

ГЛАВА 2

Электронно-оптическая система

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 ускоряющую трубку. Нерелятивистский первеанс диода равен $2 \cdot 10^{-6}$.

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

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 потребовало изготовления дополнительной оснастки для сборки индукторов.

– увеличение размеров индукторов вызвало увеличение длины средней линии их сердечников и, соответственно, тока намагничивания, электрически нагружающего элементы модулятора.

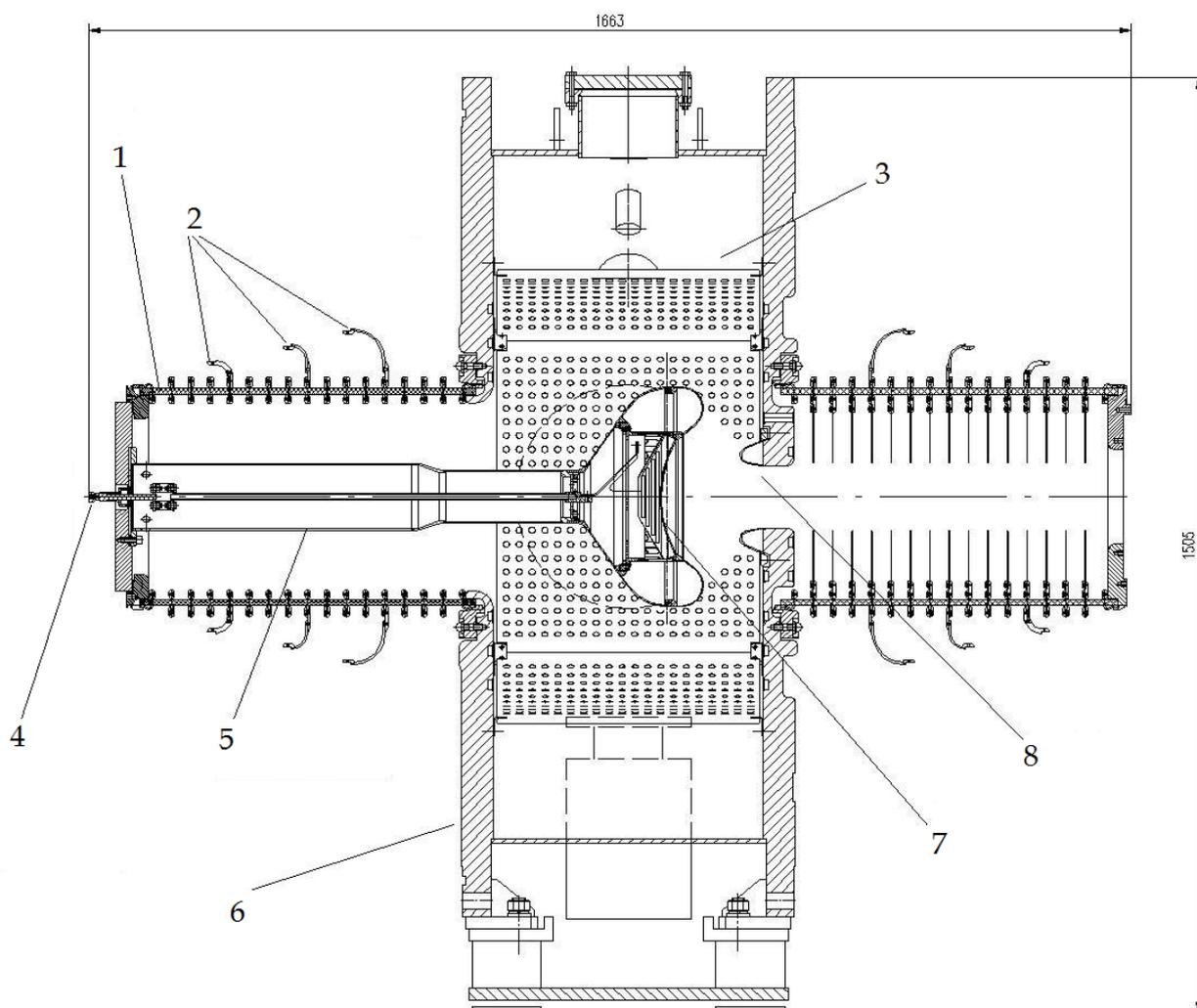


Рис. 2. ЭОС инжектора ЛИУ-2

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

2.1. Катод

В ЛИУ рассматривалось применение лишь двух типов катодов: оксидного и металлопористого (диспенсерного). Высокотемпературные катоды не рассматривались из-за большой мощности, необходимой для их нагрева. Применение оксидного и диспенсерного катодов требует надлежащих вакуумных условий в вакуумной системе ЛИУ и применение изоляторов только из алюмооксидной керамики в сверх высоковакуумном исполнении.

Диспенсерный катод \varnothing 165 мм используется в установке DARHT, США [3]. Возможно, это максимальный известный диаметр такого катода до настоящего времени.

Катод ЛИУ-2 с диаметром 180 мм имеет площадь 260 см^2 . Для его нагрева требуется до 3 кВт мощности ($10 \div 11 \text{ Вт/см}^2$) в случае оксидного катода и до 4 кВт ($13 \div 14 \text{ Вт/см}^2$) в случае диспенсерного катода. Средняя плотность тока с катода равна 7.7 А/см^2 , максимальная – 11 А/см^2 .

Окончательный вариант – диспенсерный катод был выбран после электронно-оптических расчетов для достижения минимального эмиттанса пучка.

Керн катода инжектора ЛИУ (Рис. 3) изготовлен из листа молибдена толщиной 2 мм методом штамповки, с последующим отжигом в среде водорода при температуре $900 \text{ }^\circ\text{C}$. На него наносится слой вольфрамовой губки, который затем спекается и обрабатывается в размер радиуса сферы 190 мм.

Нагреватель катода ЛИУ-2 (Рис. 4) выполнен из танталовой ленты толщиной 0.5мм, смонтированной на изоляторах из оксида алюминия.

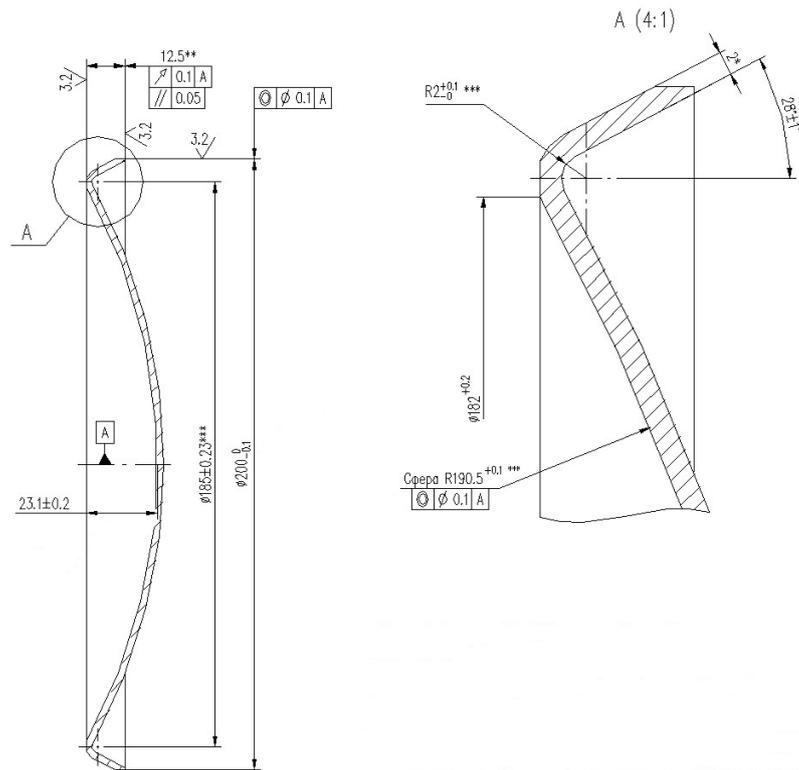


Рис. 3. Эскиз керна катода инжектора ЛИУ-2



Рис. 4. Внешний вид деталей катодного узла ЛИУ-2

Танталовая лента представляет собой спираль равномерно расположенную по конусу камеры нагревателя и имеет сопротивление при рабочей температуре около 1 Ом. Между камерой нагревателя и катодной ногой расположены тепловые экраны. Теплоизоляция катодного узла устроена так, что вместо расчётных 4 кВт достаточно мощности нагревателя 3 кВт для получения требуемого тока эмиссии.

На Рис. 5 показаны накальная характеристика и зависимость температуры катода от мощности нагрева.

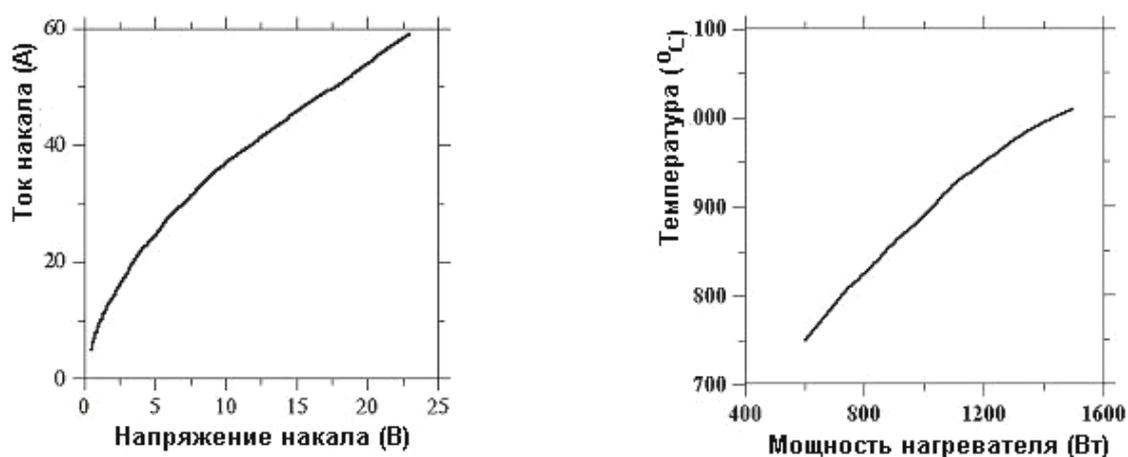


Рис. 5. Накальная характеристика катода и зависимость температуры поверхности катода от мощности нагревателя.

Эмиссионная поверхность катодного узла изготавливается с точностью 0.1 мм. Выбранная конструкция катода и подогревателя даёт однородность нагрева поверхности катода до 10 °С на уровне 1000 °С, что позволяет сохранять форму катода и однородность электронной эмиссии, т.е. его оптические свойства при различных мощностях нагрева.

Катод устанавливается на катодном держателе (Рис. 6), который выставляется на ускорительной трубке, обеспечивая совпадения осей катода и анодного отверстия в центральном корпусе.

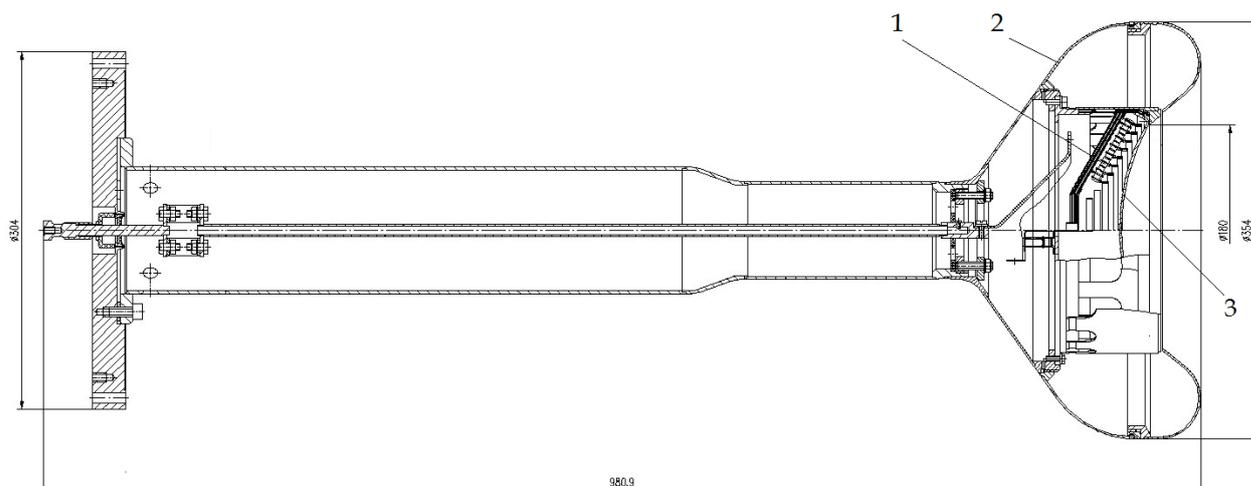


Рис. 6. Катодный держатель в сборе с катодным узлом и электродами.

1- Нагревательный элемент катода, 2- Прикатодные электроды, 3- Катод

Установка катодного держателя в ускорительной трубке производится без электродов, катода и нагревателя. Эти элементы устанавливаются через смотровые окна центрального корпуса после выставки катодного держателя относительно отверстия центрального корпуса. Приспособление для выставки катода показано на Рис. 7. Вес приспособления 5 кг, вес элементов устанавливаемых после выставки 8 кг

Жесткость катодной ноги должна обеспечить возможные перемещения после выставки в пределах 0.1 мм. Чтобы оценить порядок перемещений рассчитаем прогиб полностью собранной катодной ноги. Для расчета воспользуемся способом Верещагина [10], который позволяет определить перемещения для бруса, состоящего из прямых участков с постоянной в пределах каждого участка жесткостью. Чтобы применить правило Верещагина необходимо ввести упрощения в конструкции катодной ноги: конусную часть заменим прямой трубой с диаметром равным меньшему диаметру конуса и круглые отверстия в начале катодной ноги заменим квадратными.

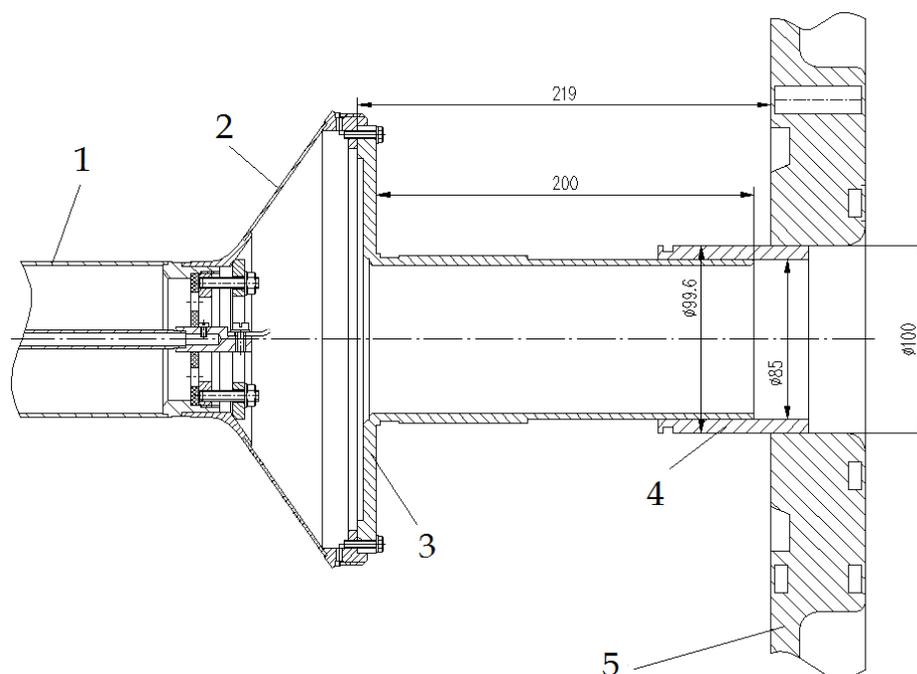


Рис. 7. Приспособление для выставки катодной ноги

1- Катодная нога, 2- Опорный фланец катодного узла, 3- Основание приспособления для выставки, 4- Калибр, 5- Стенка центрального корпуса

Катодную ногу разбиваем на 4 участка с постоянной жесткостью. Схема нагрузки показана на Рис. 8, где

- $Q_1...Q_4$ – распределенная нагрузка от собственного веса труб катодной ноги, Н/мм;
- P – нагрузка на катодную ногу от всех установленных на ней элементов, Н
- R – реакция опоры, Н
- M – момент реакции опоры, Н·м

$$Q_1=0.078 \text{ Н/мм,}$$

$$P=110 \text{ Н}$$

$$Q_2=0.055 \text{ Н/мм,}$$

$$R=155 \text{ Н}$$

$$Q_3=0.078 \text{ Н/мм,}$$

$$M=89.6 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$Q_4=0.041 \text{ Н/мм,}$$

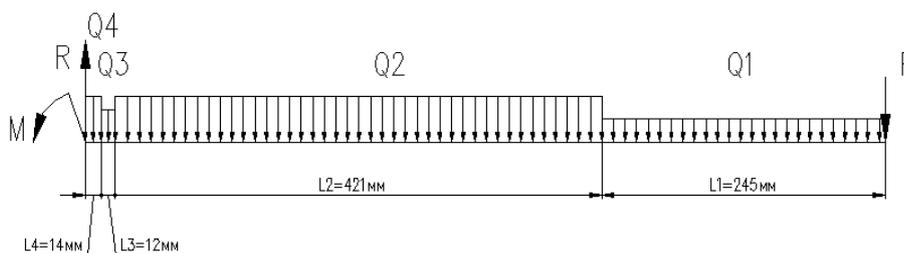


Рис. 8. Схема нагрузки на катодную ногу

Эпюры моментов от действующей нагрузки изображены на Рис. 9. Построение производилось по уравнениям моментов для каждого участка:

$M_1 = P \cdot X_1 + \frac{Q_1 \cdot X_1^2}{2}$	$0 < X_1 < L_1$
$M_2 = P \cdot (X_2 + L_1) + Q_1 \cdot L_1 \cdot \left(\frac{L_1}{2} + X_2 \right) + \frac{Q_2 \cdot X_2^2}{2}$	$L_1 < X_2 < L_2$
$M_3 = P \cdot X_3 + Q_1 \cdot L_1 \cdot \left(\frac{L_1}{2} + L_2 + X_3 \right) +$ $+ Q_2 \cdot L_2 \cdot \left(\frac{L_2}{2} + X_3 \right) + \frac{Q_3 \cdot X_3^2}{2}$	$L_2 < X_3 < L_3$
$M_4 = P \cdot X_4 + Q_1 \cdot L_1 \cdot \left(\frac{L_1}{2} + L_2 + L_3 + X_4 \right) +$ $+ Q_2 \cdot L_2 \cdot \left(\frac{L_2}{2} + L_3 + X_4 \right) + Q_3 \cdot L_3 \cdot \left(\frac{L_3}{2} + X_4 \right) + \frac{Q_4 \cdot X_4^2}{2}$	$L_3 < X_4 < L_4$

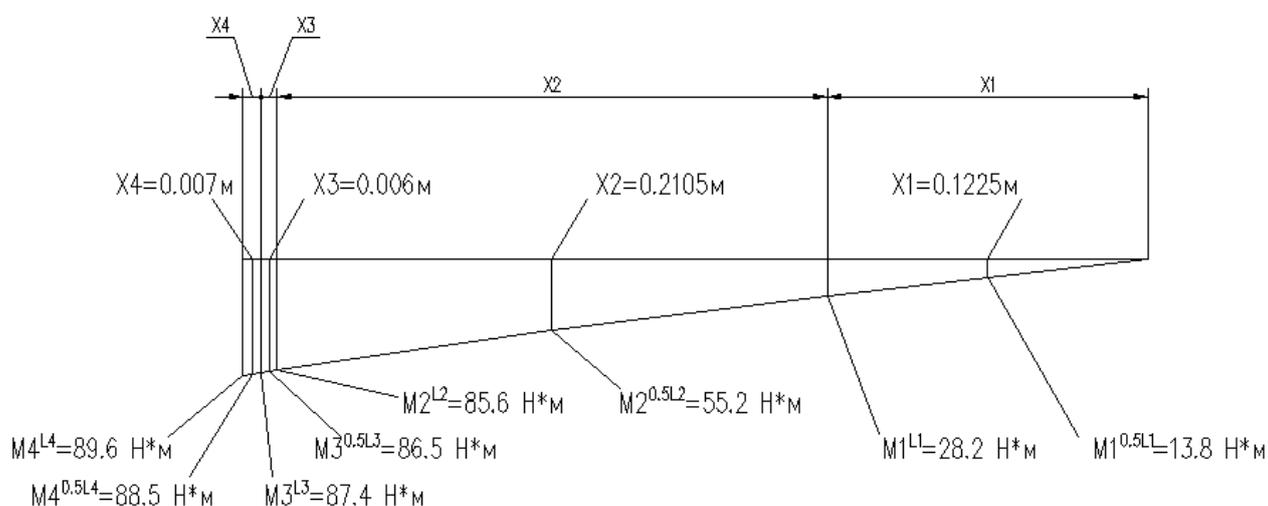


Рис. 9. Эпюры моментов

Построение эпюр моментов, определение площади эпюр и центра масс, определение ординаты единичной нагрузки под центром масс, а так же момента инерции сечений на каждом участке катодной ноги производилось при помощи программы AutoCAD. Результаты изображены на Рис. 10 и 11.

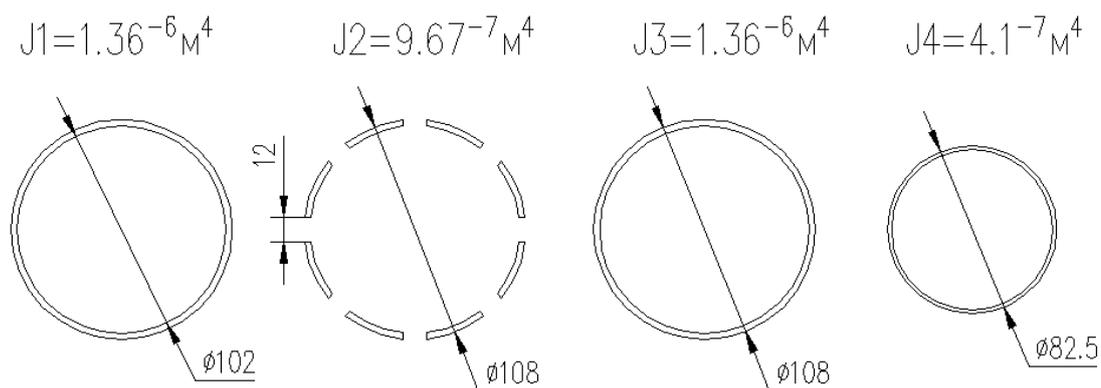


Рис. 10. Моменты инерции сечений катодной ноги

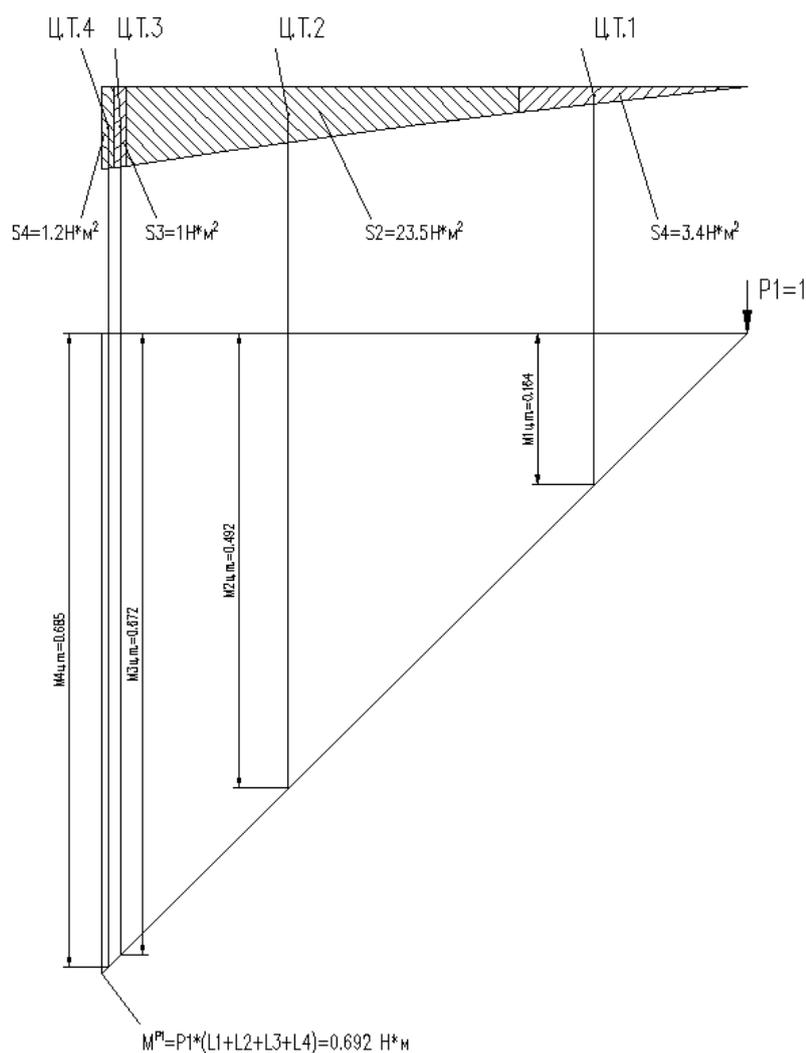


Рис. 11. Площади эпюр и положение центра масс

По правилу Верещагина перемножая площадь эпюр и ординаты единичной нагрузки, разделив на момент инерции и модуль упругости каждого участка определим перемещение в месте приложения единичной нагрузки.

$$\Pi = \frac{S_1 \cdot M_{1ц.т.}}{E \cdot J_1} + \frac{S_2 \cdot M_{2ц.т.}}{E \cdot J_2} + \frac{S_3 \cdot M_{3ц.т.}}{E \cdot J_3} + \frac{S_4 \cdot M_{4ц.т.}}{E \cdot J_4} = 0.056 \text{ мм}$$

Перемещение меньше 0.1 мм следовательно жесткость катодного держателя обеспечивает требуемую точность выставки катода относительно анода.

2.2. Анод

Анод (Рис. 12) изготовлен из листа молибдена толщиной 2 мм методом выдавливания с последующей обработкой сферы и посадочной поверхности для установки в корпусе катодного держателя.

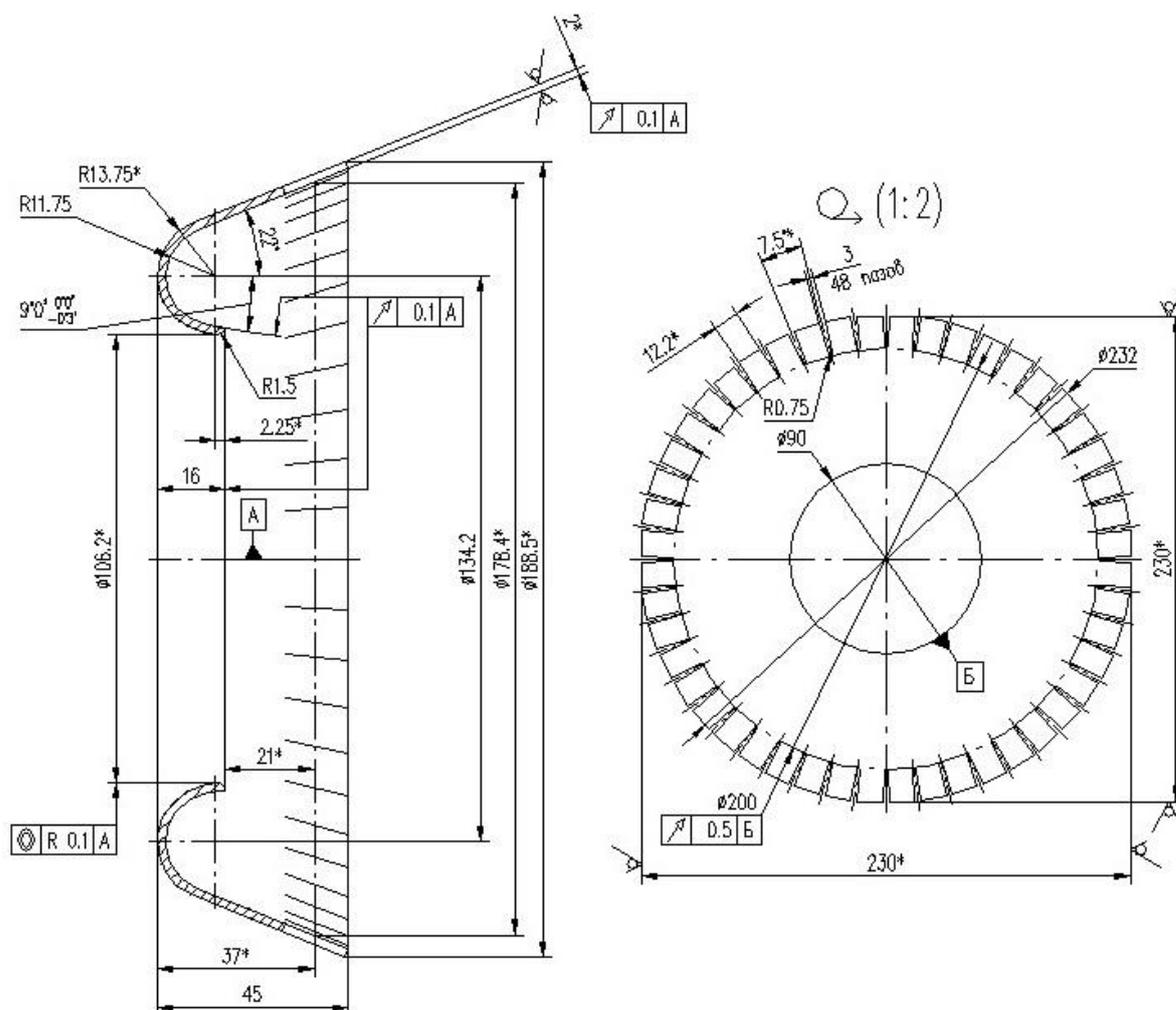


Рис. 12. Анод ЛИУ-2

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.

2.3. Ускорительные трубки

Надежность работы всего ускорителя определяется, в том числе надежностью ускорительных трубок (Рис.13), которые изготавливаются из керамических колец и медных электродов, спаянных между собой.

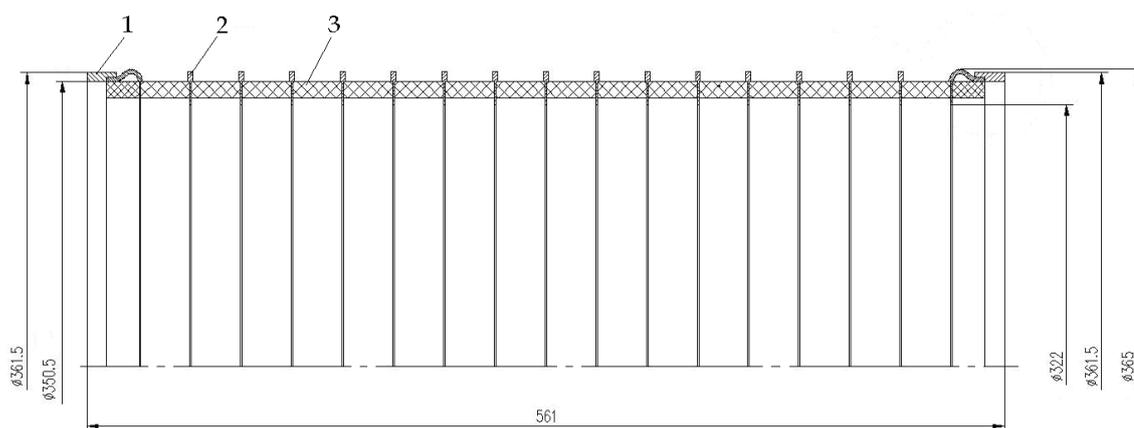


Рис. 13. Секционированный проходной высоковольтный изолятор сверхвысоковакуумного исполнения

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

Для сварки фланцев на концах ускорительных трубок припаяны биметаллические электроды. Биметаллический электрод представляет собой паяную деталь, состоящую из медной манжеты и кольца изготовленного из нержавеющей стали 12Х18Н10Т (Рис. 14). Электроды и манжета изготовлены из меди М0б. Для пайки нержавеющей стали и меди в биметаллическом

электроде использовался припой Ni80 (82% Au и 18% Ni) при температуре пайки 1000 °С. Для пайки медных электродов и керамических колец применялся припой ПСр-72.

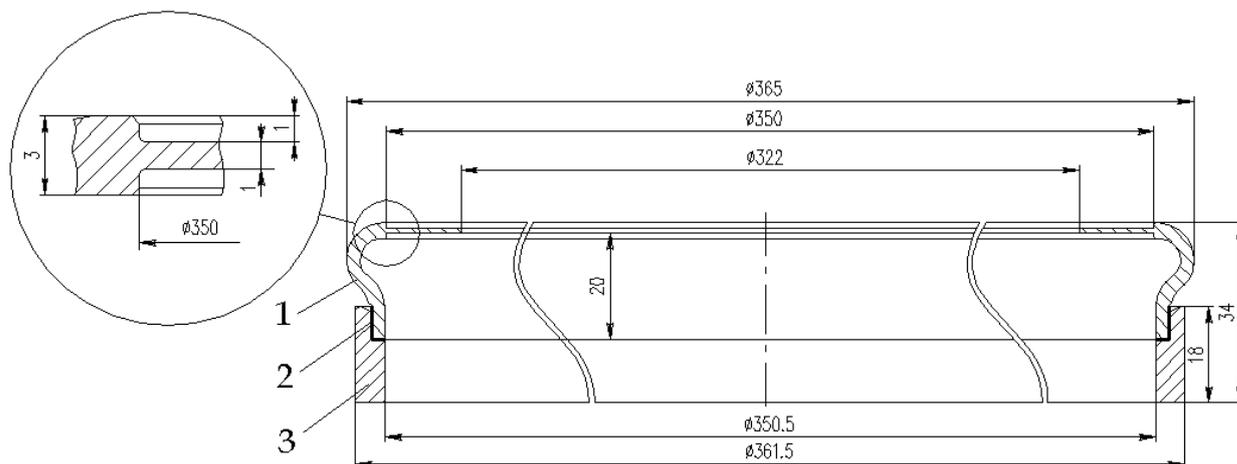


Рис. 14. Биметаллический электрод

1- Медная манжета, 2- Паяный шов, 3- Кольцо 12X18H10Т

Металлические детали ускорительных трубок изготовлены на экспериментальном производств (ЭП) ИЯФ, керамика (99,5% окись алюминия, плотность 3.95 г/см³) и пайка изолятора производились в FRIATEC, Манхейм, Германия. После пайки в Германии в ЭП 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 (Рис. 15). Крепление приспособления на изоляторе производилось при помощи хомута, на котором устанавливалась опора с винтами для регулировки и шпильками для прижима фланца к изолятору. Положение фланца центрального корпуса по отношению к

изолятору регулировалось в опоре. Положение фланцев катодного держателя и вакуумной камеры по отношению к изолятору регулировалось совместно с опорами.

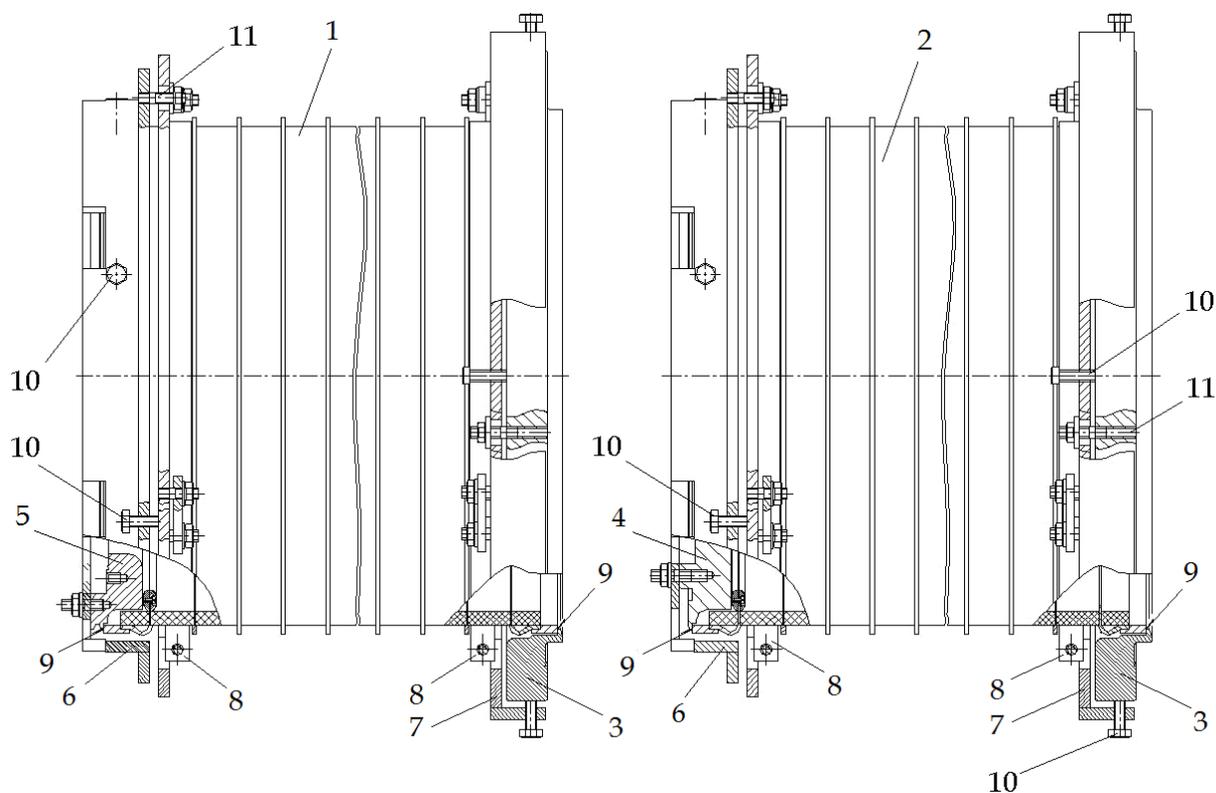


Рис. 15. Приспособления выставки фланцев на изоляторе

1- Ускорительная трубка катодного держателя, 2- Ускорительная трубка вакуумной камеры, 3- Фланец центрального корпуса, 4- Фланец вакуумной камеры, 5- Фланец катодного узла, 6- Опоры фланцев катодной ноги и вакуумной камеры, 7- Опора фланца центрального корпуса, 8- Хомут, 9- Сварной шов, 10- Винт регулировочный, 11- Шпилька прижимная

Ускорительные трубки крепятся к центральному корпусу на высоковакуумное прогретое соединение (ConFlat) нестандартного исполнения с условным диаметром прохода 387мм. С одной стороны центрального корпуса устанавливается ускорительная трубка первой ускорительной части (Рис. 16), с другой стороны ускорительная трубка второй

ускорительной части инжектора (Рис. 17). Фланцы ускорительных трубок для крепления к центральному корпусу выполнены с одинаковыми диаметрами.

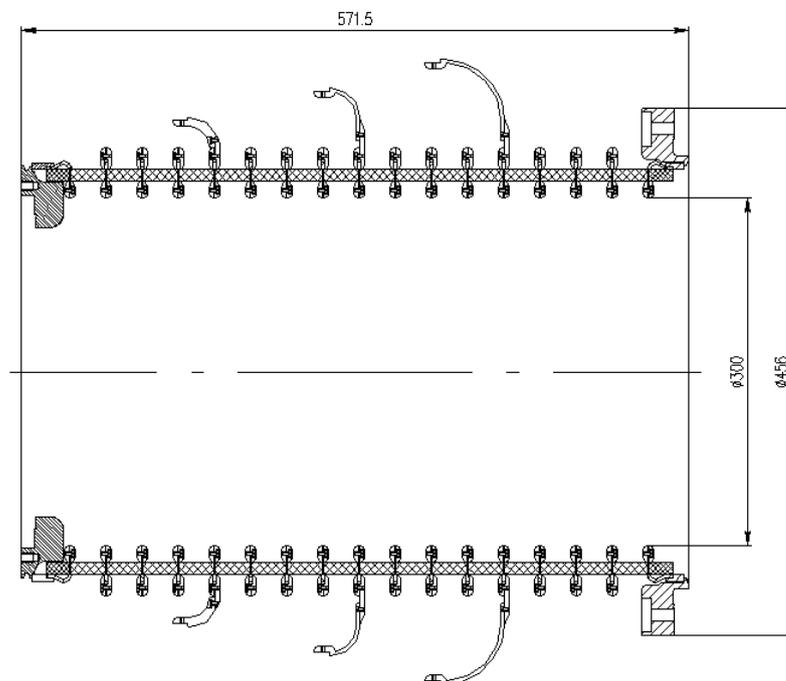


Рис. 16. Ускорительная трубка первой ускорительной части

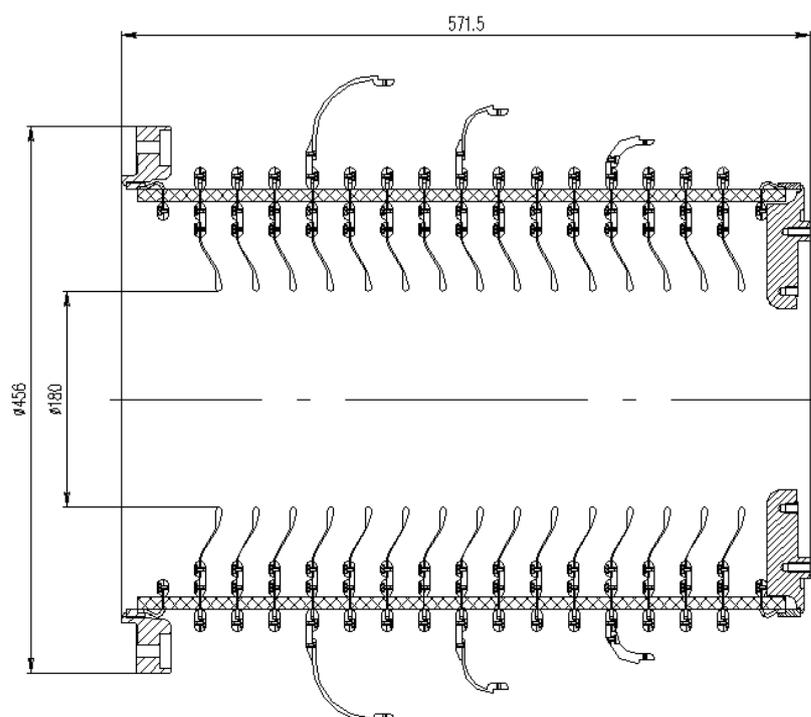


Рис. 17. Ускорительная трубка второй ускорительной части

Внутри и снаружи ускорительных трубок устанавливаются электроды. Форма электродов (Рис. 18) внутри ускорительной трубки на выходе пучка имеет сложную форму с переменной толщиной для уменьшения напряжения возникающего от собственного поля пучка.

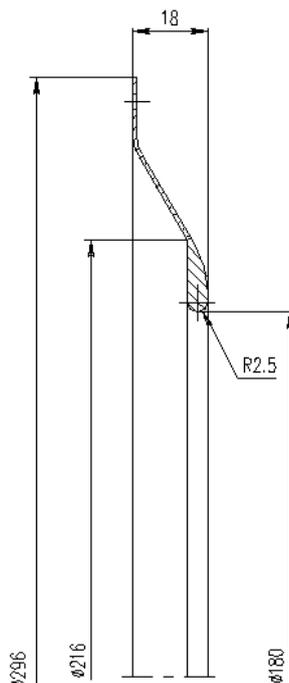


Рис. 18. Внутренний электрод ускорительной трубки

Каждое кольцо обоих керамических изоляторов шунтировано резисторами (Рис. 19) 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.

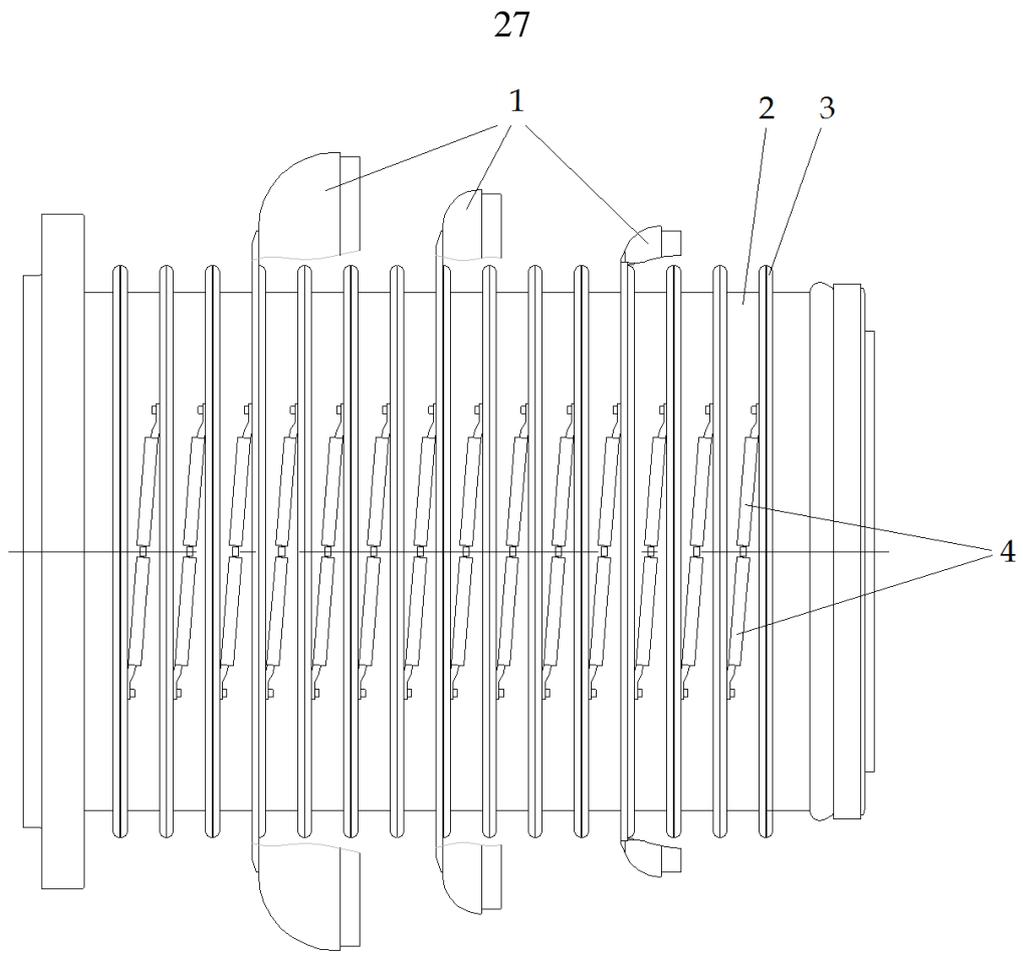


Рис. 19. Резисторы на ускорительной трубке второй ускорительной части
1- Разъемы для выравнивающих электродов, 2- Секционный изолятор ускорительной трубки, 3- Наружный электрод, 4- Шунтирующие резисторы

ГЛАВА 3

Центральный корпус

Элементы электронно-оптической системы ускорителя монтируются на центральном корпусе (Рис. 20). Корпус 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 демонтаж электродов катода и кроме того выставку катодного держателя соосно с анодным отверстием центрального корпуса.

Для отвода избыточного тепла в стенках центрального корпуса предусмотрены каналы охлаждения.

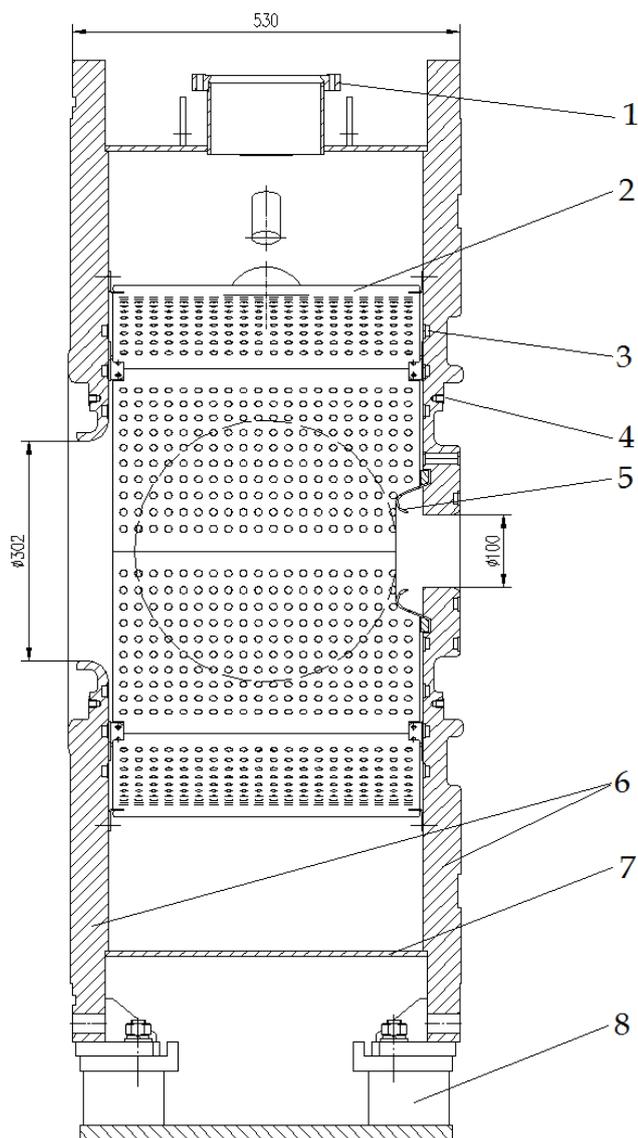


Рис.20. Центральный корпус ЛИУ-2

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

3.1. Корпус

Для успешной работы ускорителя точность выставки каждого элемента электронно-оптической системы должна быть не более 0.1 мм, что

соответственно требует точной обработки посадочных мест на корпусе. Соосность отверстий на боковых стенках корпуса выполнена в пределах 0.1 мм. Параллельность посадочных мест под ускорительные трубки 0.1 мм, а посадочных мест под корпуса индукторов 0.3 мм на диаметре 1350 мм. Так как внутри корпуса вакуум, а снаружи боковых стенок находится элегаз под давлением 0.7 ати, то перепад давления на стенке составил 1.7 ати. Соответственно нагрузка на стенке центрального корпуса – 18500 кг. Для достижения заявленных параметров пучка необходимо чтобы прогиб стенок корпуса был не более 0.5 мм. Для этого был выполнен расчет стенок. Расчеты показали, что прогиб стенок корпуса при толщине 50 мм не более 0.3 мм, что соответствует заданным параметрам. Вес корпуса при толщине стенок 50 мм после сварки 1450 кг. Фрагмент чертежа показан на Рис. 21.

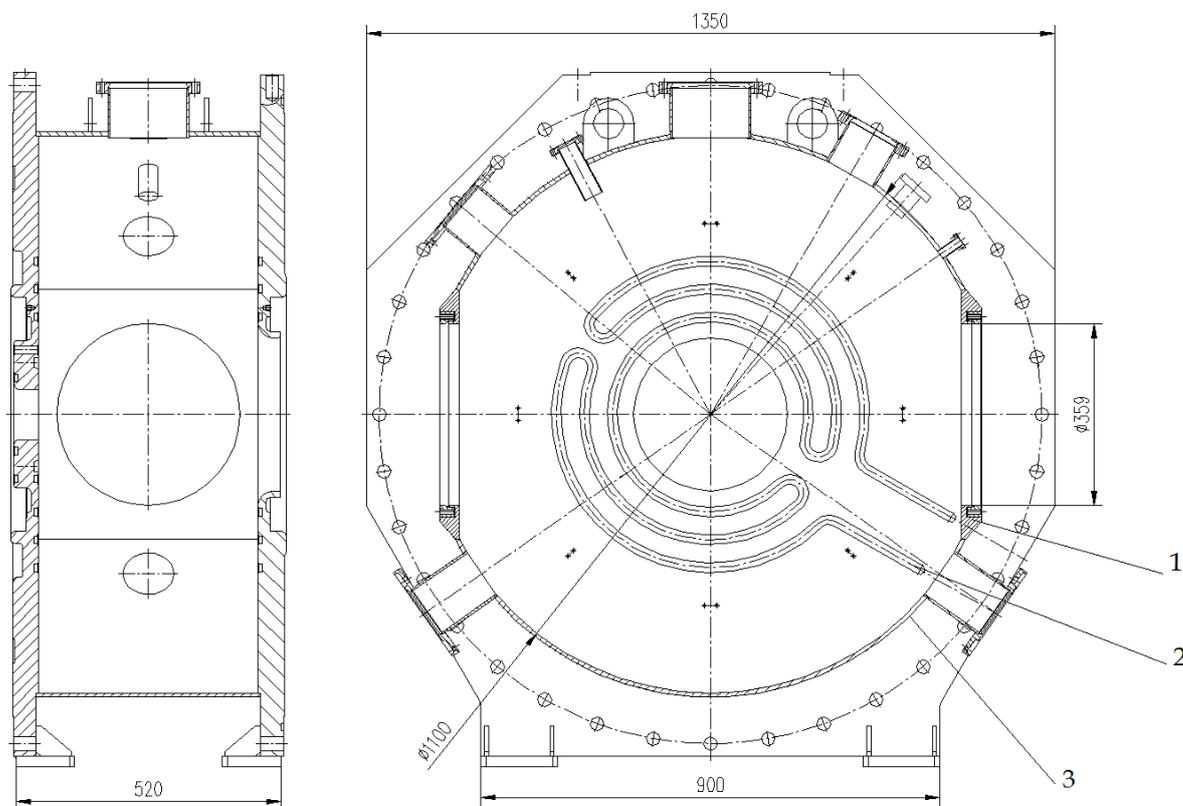


Рис. 21. Центральный корпус

1- Смотровое окно, 2- Канал охлаждения, 3- Обечайка корпуса

Система охлаждения представляет собой прямоугольные канавки, концентрично фрезерованные относительно центральных отверстий на внутренней поверхности стенок центрального корпуса. Подвод воды выведен на боковую поверхность стенки. По контуру канавки герметично заварены крышками, обеспечивая выкуум внутри корпуса $5 \cdot 10^{-8}$ Торр. Все патрубки центрального корпуса для подсоединения вакуумного оборудования и элементов измерения выполнены с уплотнением CF (ConFlat). Для соединения ускорительных трубок и смотровых окон были разработаны уплотнения с диаметрами 360 и 387 мм соответственно. На корпусе предусмотрены площадки под геознаки.

3.2. Опора корпуса

Важным моментом сборки ускорителя является выставка центрального корпуса относительно мишенного узла. Расстояние между анодным отверстием центрального корпуса и мишенной пластиной составляет 3675 мм. Ускорительные трубки и первая линза монтируются без возможности выставки. Их положение определяется только точностью изготовления посадочных мест этих изделий. Поэтому в опоре обработка опорных площадок требуется с обеспечением плоскостности поверхностей не более 0.05 мм. Для выставки с максимальной точностью используются регулировочные винты с мелким шагом резьбы. Конструкция опоры показана на Рис. 22.

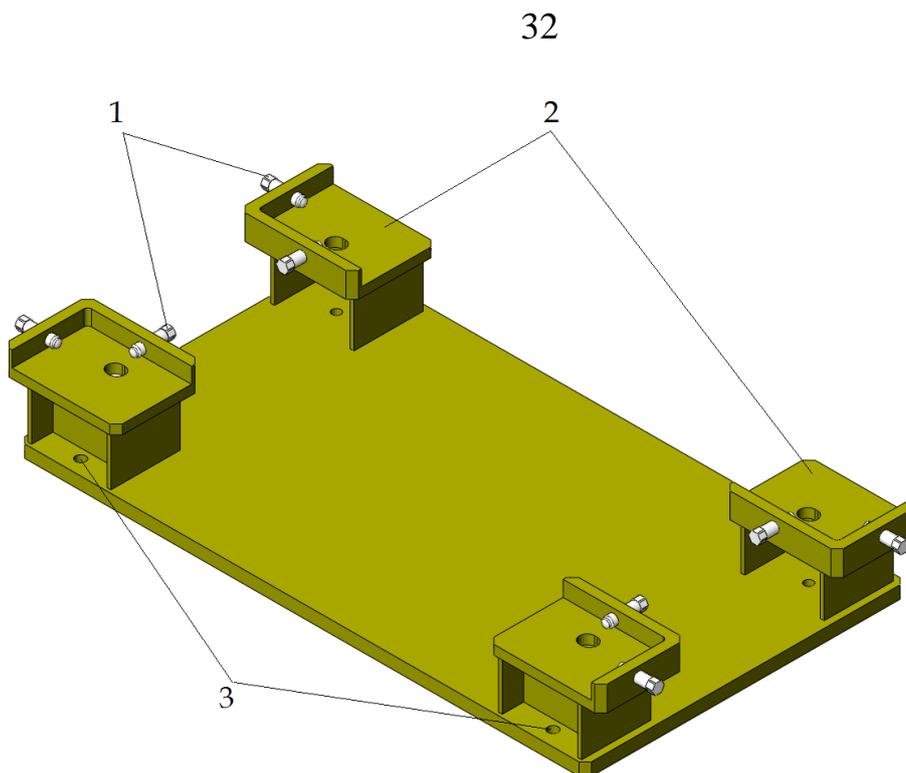


Рис. 22. Опора центрального корпуса

1- Регулировочные винты, 2- Опорные площадки, 3- Отверстия для регулировки по высоте.

3.3. Экран

В обечайке центрального корпуса сделано несколько отверстий под патрубки для насосов и элементов контроля, что влияет на качество электрического поля. Для обеспечения симметричного поля вокруг катода установлен экран. Экран изготовлен из листа нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 2 мм. Он полностью закрывает прикатодные электроды от наружной обечайки центрального корпуса. Экран перфорирован отверстиями диаметром 10 мм и имеет разборную конструкцию, состоящую из 8 элементов. Всего в экранах находится 1600 отверстий. Для того чтобы уменьшить возможность возникновения разряда между прикатодными электродами и

экраном, кромки всех отверстий скруглены радиусом 1 мм со стороны катода.
Конструкция экрана установленного в корпусе изображена на Рис. 23.

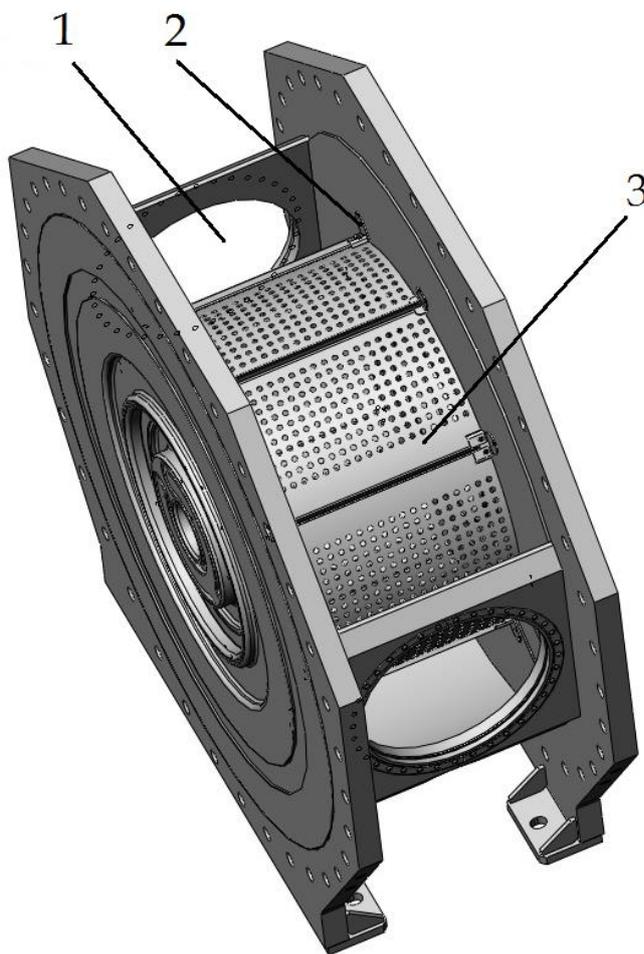


Рис. 23. Экран, установленный в корпусе

1- Смотровое окно центрального корпуса, 2- Опора экрана, 3- Элемент экрана

Размер элемента экрана (Рис. 24) подобран так чтобы его можно было установить через смотровое окно корпуса.

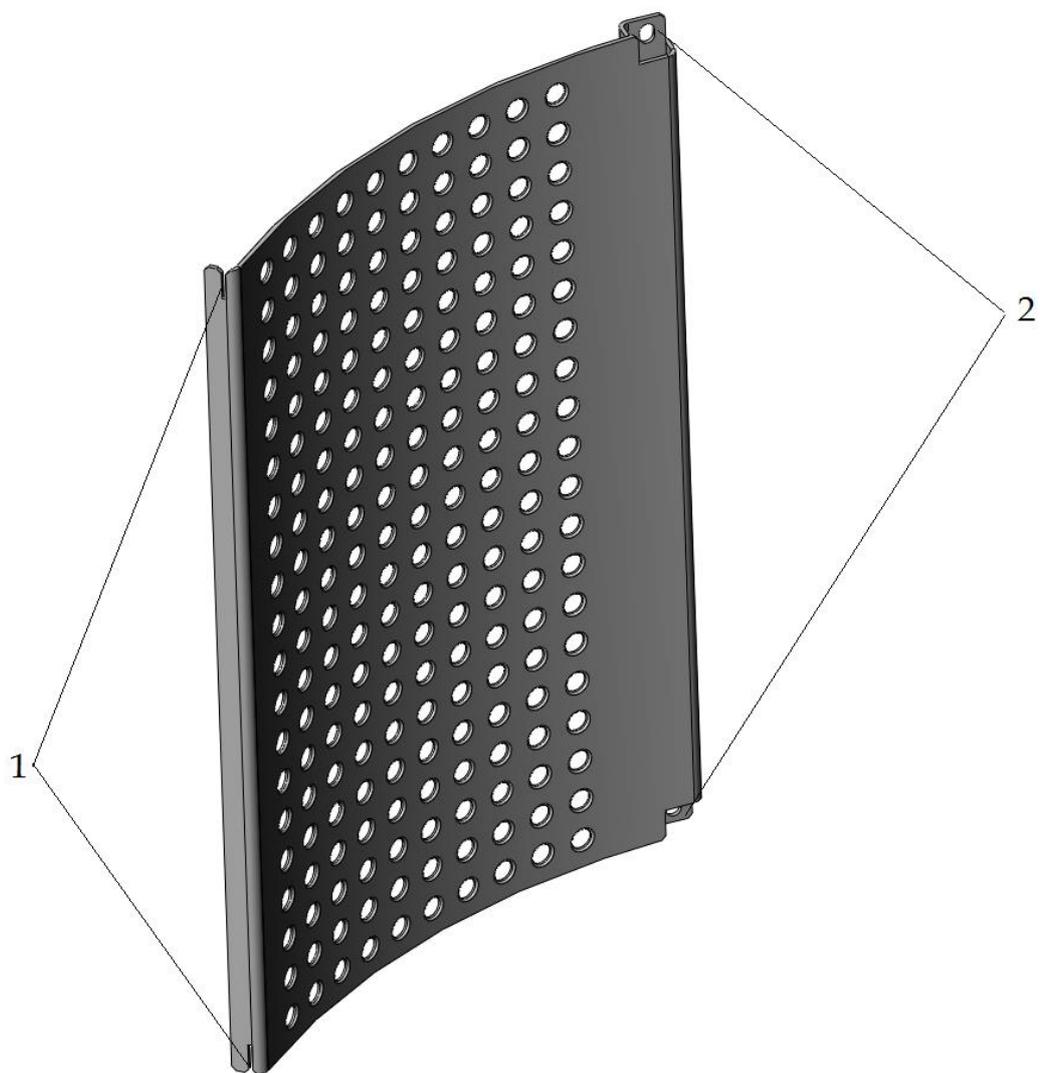


Рис. 24. Элемент экрана

1- Фиксирующие пазы, 2- Посадочные поверхности

ГЛАВА 4

Вакуумная камера

Вакуумная камера (Рис. 25) предназначена для транспортировки пучка электронов от центрального корпуса до мишенного узла. Для фокусировки пучка во время пролета на камере расположены элементы фокусировки, три линзы и корректор. Камера крепится на регулируемой опоре, которая позволяет выставить соосно вакуумную камеру и центральный корпус. Для контроля выставки вакуумной камеры после сборки ускорителя предусмотрены съемные опоры под геознаки. Выставка вакуумной камеры производится при помощи лазер трекера до установки корпусов индукторов. При помощи регулируемой опоры выставляется положение камеры, обеспечивающее совпадение осей камеры, центрального корпуса и корпуса мишенного узла. Затем положение камеры фиксируется на опоре и опора может быть демонтирована для установки корпусов индукторов.

Требования к вакуумной системе в основном определяются типом используемого в ускорителе катода. Диспенсерный катод диаметром 180 мм имеет рабочую температуру от 950 до 1100 °С, при этом вакуум в инжекторе должен быть не хуже $5 \cdot 10^{-8}$ Торр. Эти требования однозначно определяют тип откачки вакуумной системы ускорителя, она должна быть безмасляной, кроме того все элементы вакуумной камеры ускорителя должны перед сборкой проходить обезгаживающий отжиг в вакуумной печи. Сборка высоковакуумной системы должна проходить в обеспыленном помещении. В соответствии с этим для предварительной откачки и обдувки системы используется только безмасляный откачной пост и гелиевый течеискатель. Все

уплотнения на фланцевых соединениях вакуумной системы – медные. Для основной откачки используются магнитоэлектрические насосы типа НМД с суммарной производительностью 900 л/с.

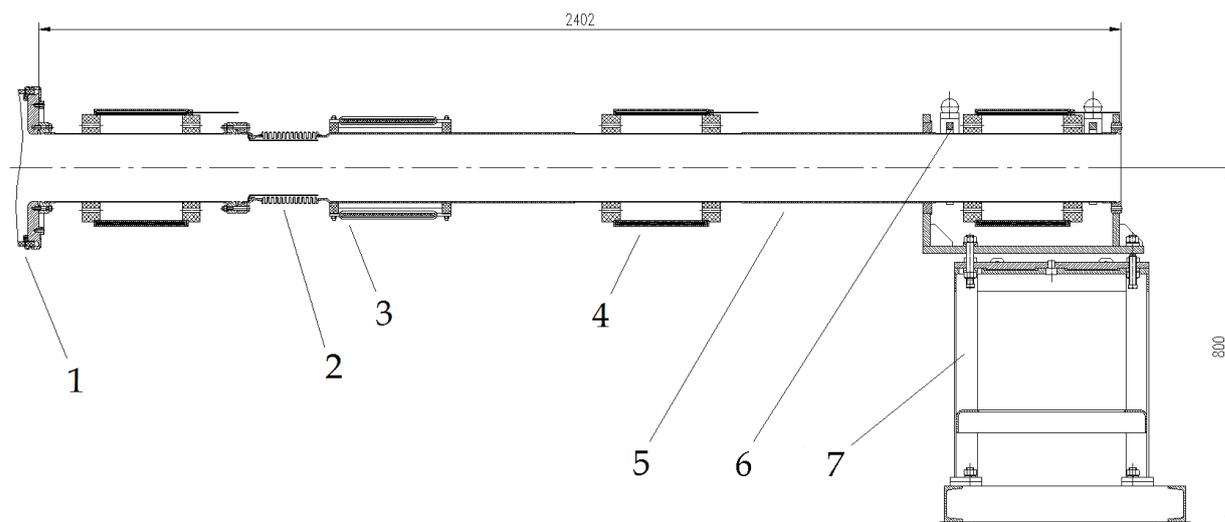


Рис.25. Вакуумная камера

1- Ускорительная трубка, 2- Сильфонный узел, 3- Корректор (вес 8.5 кг), 4- Линза (вес 18 кг), 5- Вакуумная камера, 6- Опора под геоэтикетки, 7- Опора вакуумной камеры

4.1. Камера

Камера с Ду 151 мм состоит из двух частей см. Рис.26. Первая короткая длиной 439 мм устанавливается на ускоряющей трубке, вторая длиной 1963 мм имеет собственную опору. На второй части также есть сильфонная развязка, обеспечивающая возможность выставки вакуумной камеры. Труба второй части длиной 1736.5 мм цельная, без стыковых швов, обрабатывается с двух сторон и изготовлена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Консоль

второй части камеры составляет 1300 мм. Прогиб камеры под нагрузкой от корректора (8.5 кг) и двух линз (18 кг каждая) составляет 0.15 мм, что находится в допуске требований к прямолинейности камеры 0.2 мм (+/- 0.1 мм). Для фиксации от продольного перемещения на одном из опорных фланцев второй части камеры предусмотрен упор.

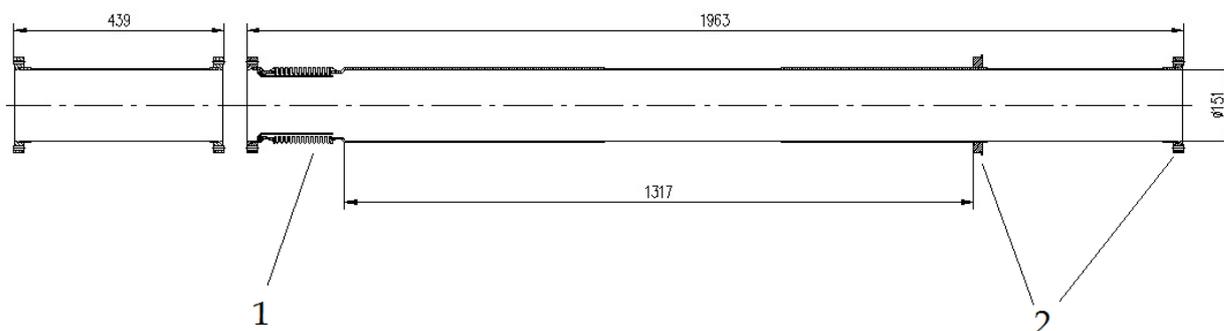


Рис. 26. Камера

1- Сильфонный узел, 2 Опорные фланцы

4.2. Опора

Опора (Рис. 27) служит для фиксации и регулировки положения вакуумной камеры. Камера фиксируется в кронштейне, который установлен на подвижной плите сварного каркаса. Подвижная плита позволяет регулировать положение камеры в двух координатах. Все элементы выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Регулировка позволяет выставить камеру в пределах ± 10 мм по горизонтали и вертикали, а также по наклону $\pm 1.5^\circ$.

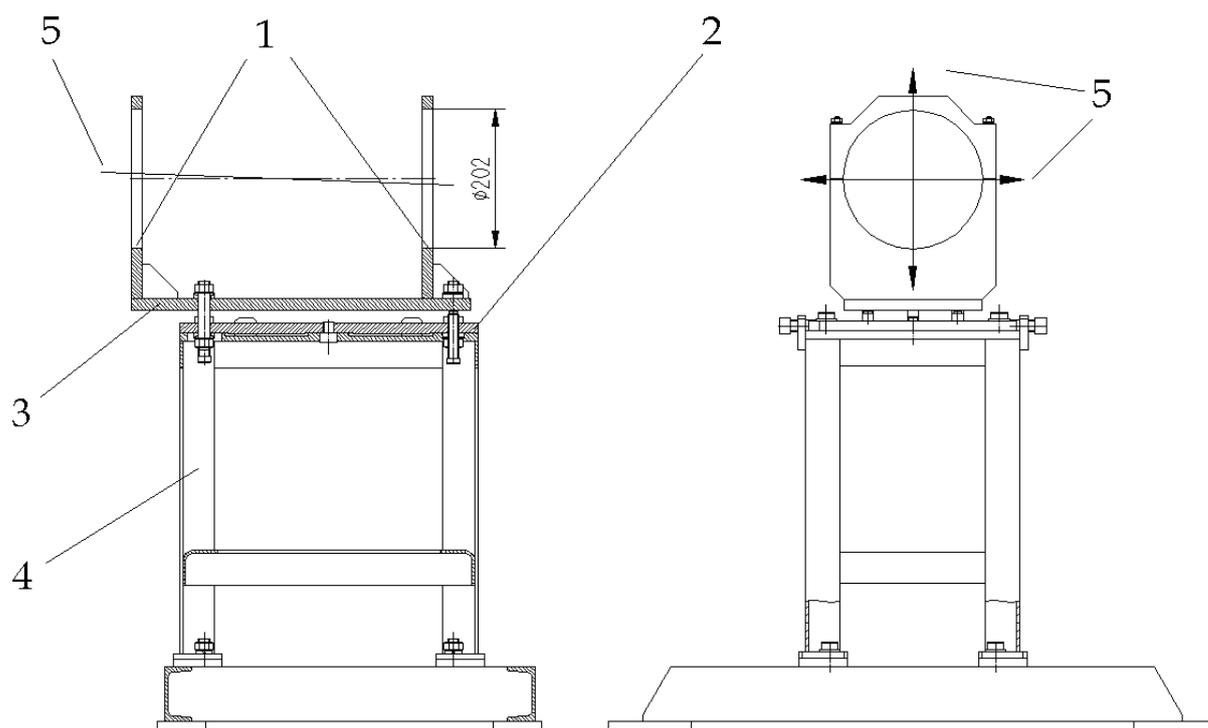


Рис. 27. Опора вакуумной камеры

1- Посадочные места для вакуумной камеры, 2- Подвижная плита, 3- Опора, 4- Каркас, 5- Направления регулировки положения вакуумной камеры

ГЛАВА 5

Система фокусировки пучка

Система фокусировки предназначена для качественной транспортировки пучка электронов от катода до мишенного узла, на котором сфокусированный пучок должен иметь требуемый поперечный размер. В состав системы входят три импульсных линзы типа 1, одна линза типа 2 и двух координатный корректор на постоянном токе. Оба типа линз кроме того имеют специальный дизайн, для того чтобы максимально уменьшить величину сферической aberrации пучка. Корректор располагается после первой линзы и компенсирует слабые внешние магнитные поля. Все линзы и корректор имеют индивидуальное питание с долговременной стабильностью лучше 0.1%.

Расположение элементов фокусировки рассчитывалось в лаборатории 5-1 ИЯФ СО РАН. Положение всех элементов фокусировки показано на Рис. 28.

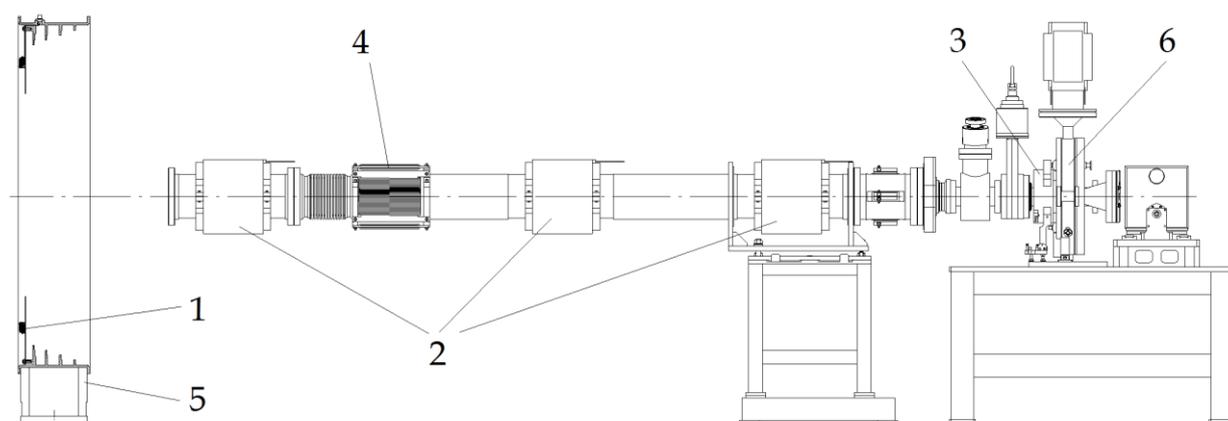


Рис.28. Элементы фокусировки пучка

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

5.1. Линза тип 1

Продольное магнитное поле формируется кольцевыми катушками, намотанными медной шиной 1,97x4,25 мм марки ПСД. В каждой катушке по 82 витка. Рабочий ток – 250 А. Напряжение питания – 1 кВ.

Расчет магнитного поля проводился с помощью программы MERMAID для каждой отдельной линзы (Рис. 29).

Опоры линзы изготовлены с точностью обеспечивающей положение катушки соосно с вакуумной камерой до 0.1 мм .

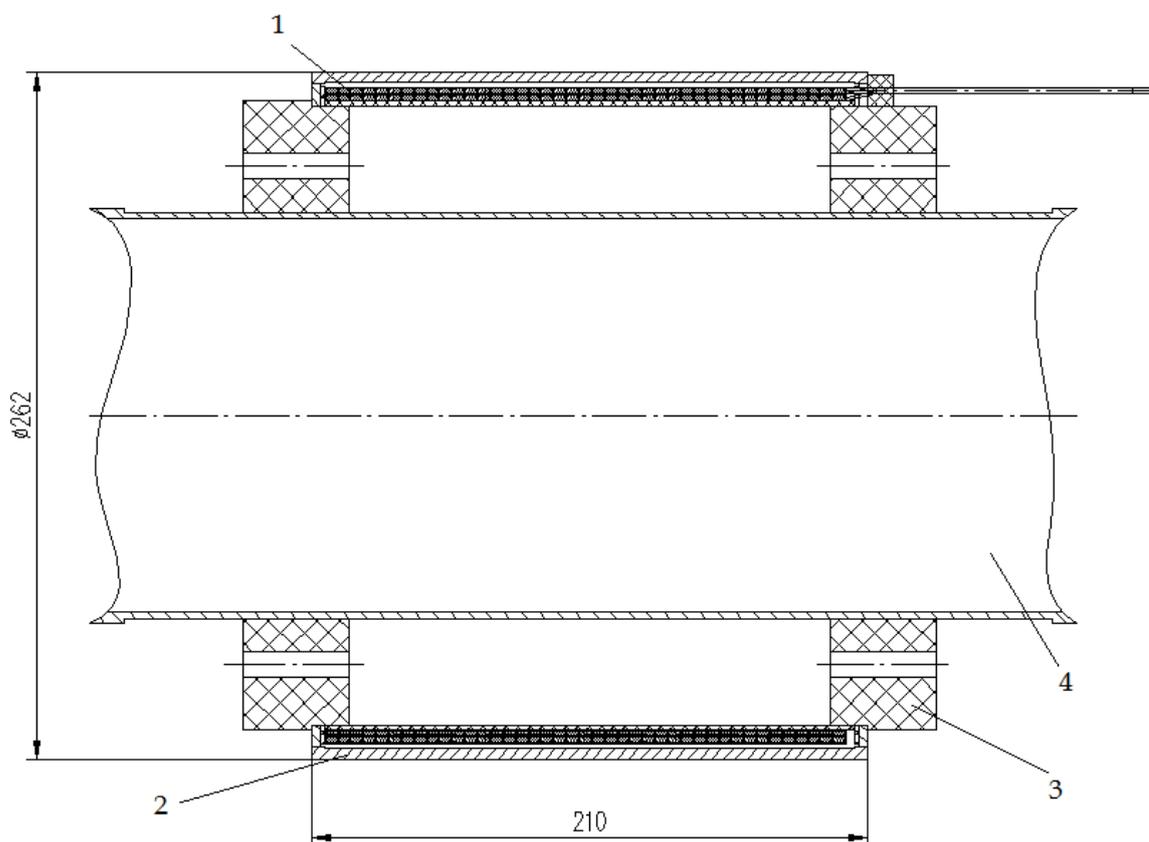


Рис. 29. Линза тип 1

1- Катушка, 2- Магнитопровод, 3- Опора изоляционная, 4- Камера вакуумная

5.2. Линза тип 2

Перед входом пучка в мишенный узел стоит последняя линза (Рис. 30), предназначенная для фокусировки пучка в заданный размер (1,5 мм) на мишени. Для изготовления линзы 2 использовалась такая же медная шина как и для линзы типа 1 сечением 1,97x4,25 мм марки ПСД. В катушке сделано 110 витков, намотанных в 10 слоев. Рабочий ток – 250 А. Напряжение питания – 1 кВ.

Линза устанавливается в регулирующую изоляционную опору, размещенную на мишенном узле.

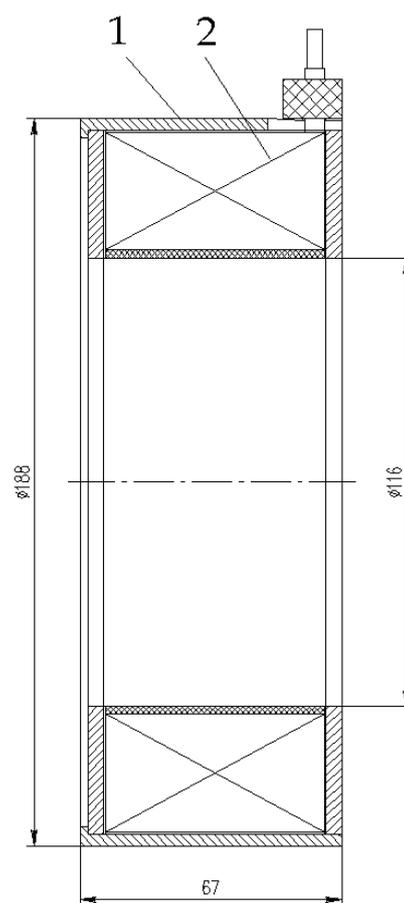


Рис. 30. Линза тип 2

1- Опорная обечайка, 2- Катушка

5.3. Корректор

Для изменения положения оси пучка используется корректор (Рис. 31). Для изготовления катушки корректора использовался медный провод диаметром 2.3 мм марки ПСД. В одной катушке сделано 58 витков в один слой. Катушки выполнены на прямоугольных пластинах, которые закреплены на разборной опоре. Разборная опора представляет собой квадратный изолятор, разрезанный по диагонали с центральным отверстием для крепления на вакуумной камере. Параметры корректора:

-Максимальный ток 20 А

-Напряжение питания max 10 В.

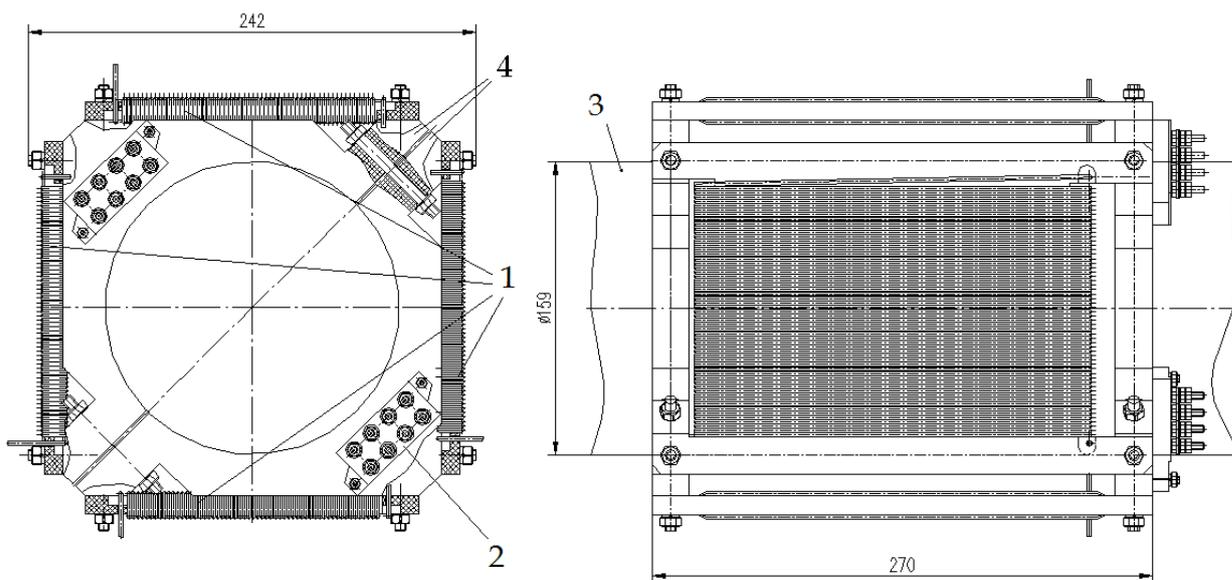


Рис. 31. Корректор

1- Катушки, 2 Клемма, 3- Вакуумная камера, 4- Опора разборная

5.4. Корректирующая катушка

Корректирующая катушка (Рис. 32) устанавливается сразу на выходе пучка электронов из центрального корпуса. Катушка позволяет

корректировать нормальную компоненту магнитного поля в области катода, устраняя наводку от земного магнитного поля и магнитного поля первой фокусирующей линзы.

Опорный диск катушки, выполняющий защитный экран монтируется в первом корпусе индукторов от центрального корпуса.

Соосность катушки с осью пучка электронов обеспечивается точностью обработки посадочных мест в корпусе индуктора и на опорном диске корректирующей катушки.

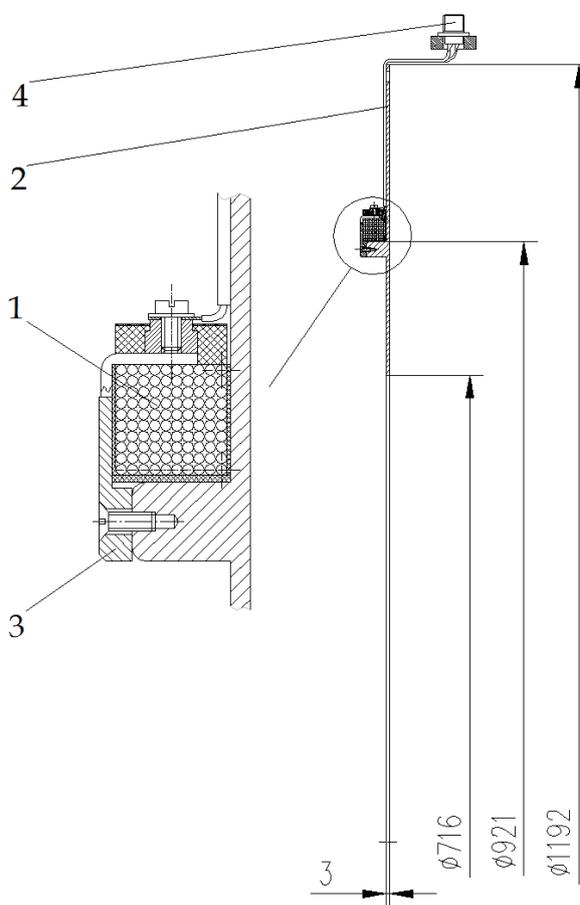


Рис. 32. Катушка корректирующая

1- Катушка, 2- Опорный диск, 3- Прижим, 4- Разъем

ГЛАВА 6

Индукторы импульсного трансформатора

Полное ускоряющее напряжение линейного индукционного ускорителя складывается из напряжения на каждом индукторе. Для питания индукторов применяются импульсные генераторы (модуляторы). Ускоритель состоит из двух секций по 1 МВ. В каждой секции используется по 48 индукторов. Ускоряющее напряжение прикладывается к ускорительным трубкам, через первую из которых проходит катодный держатель с катодом на конце, а через вторую проходит собственно пучок (Рис. 33).

Все индукторы, изготовленные из аморфного железа сплав 2НСР, разбиты по группам, состоящим из 4 индукторов. Группа индукторов размещается в отдельном корпусе. В корпусе каждый индуктор имеет кожух с посадочным местом своего типоразмера. 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. Общий вид корпуса индуктора показан на Рис. 34.

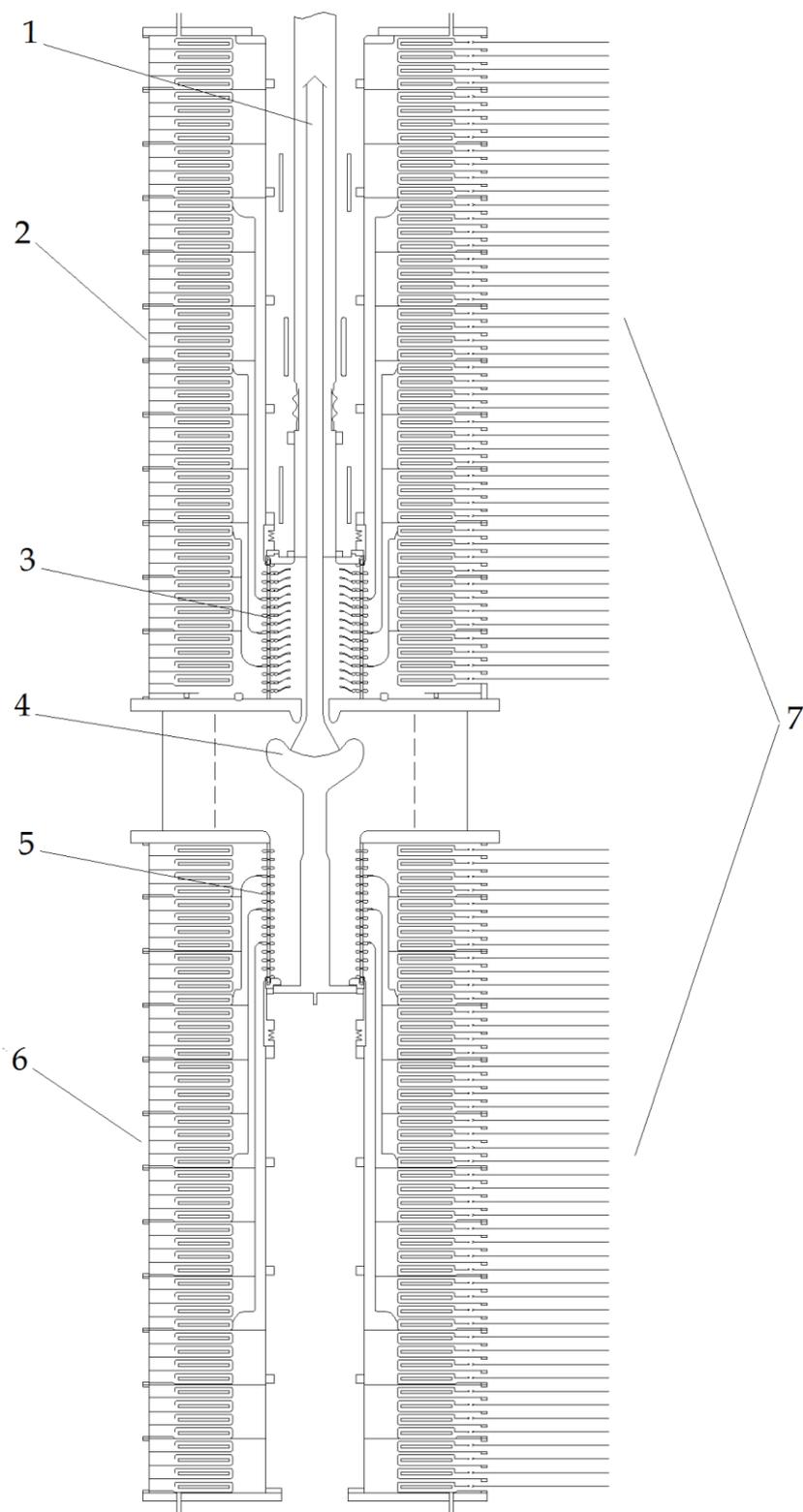


Рис. 33. Общая схема сборки индукторов

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

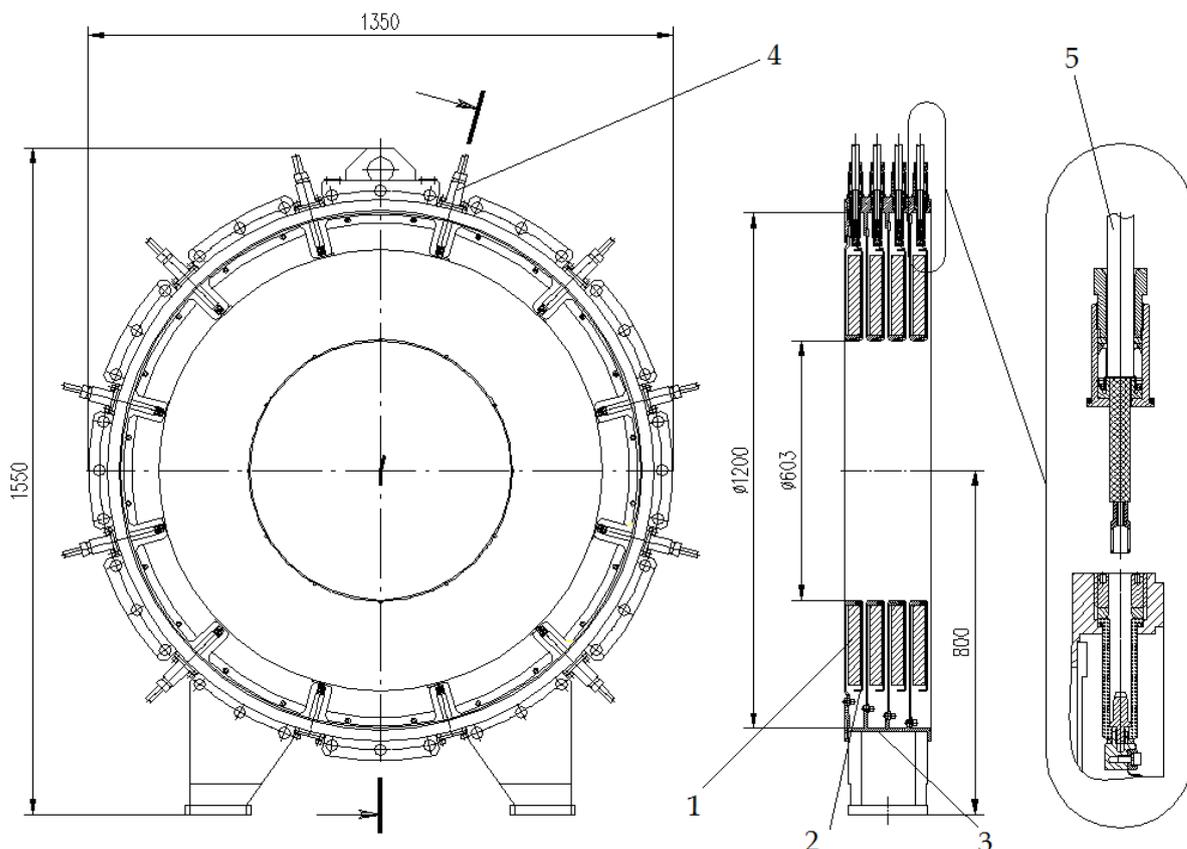


Рис. 34. Индукторы в корпусе

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

6.1. Индуктор

Разработка индукторов линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) на длительности импульсов в пределах 500 нс проводилась в СССР во второй половине двадцатого века в основном на базе пермалля 50НП [11]. В настоящее время производство дорогостоящих материалов типа пермалля сведено к минимуму или совсем прекращено, и на смену пришли

разработанные в семидесятые годы прошлого века и весьма широко распространенные в настоящее время более дешевые аморфные материалы (АМ) [12].

Аморфные материалы по всем своим показателям в целом не уступают пермаллоям, а в технологическом плане явно их превосходят. Они не требуют проката до нужной толщины, так как они получают непосредственно при разливе металла на быстро вращающийся барабан. Отжиг сердечников проводится при температурах не более 470 °С в воздушной среде, в то время как пермаллои требуют отжига при температуре порядка 900 °С в вакууме. К тому же нынешние аморфные материалы на основе железа не требуют дефицитных редкоземельных металлов.

В ИЯФ была проведена экспериментальная работа с сердечниками из аморфных материалов 2НСР и 5БДСР производства Ашинского металлургического завода АМЗ. Изготовление индукторов проводилось на оборудовании Московского радиотехнического института (г. Москва), а основная часть индукторов толщиной 5 мм на АМЗ. В соответствии с предварительными результатами испытаний лучшими характеристиками обладают сердечники из сплава 2НСР.

Для ЛИУ использовалась лента шириной 5мм. Намотка производилась на специально разработанном для изготовления индукторов стенде (Рис. 35).

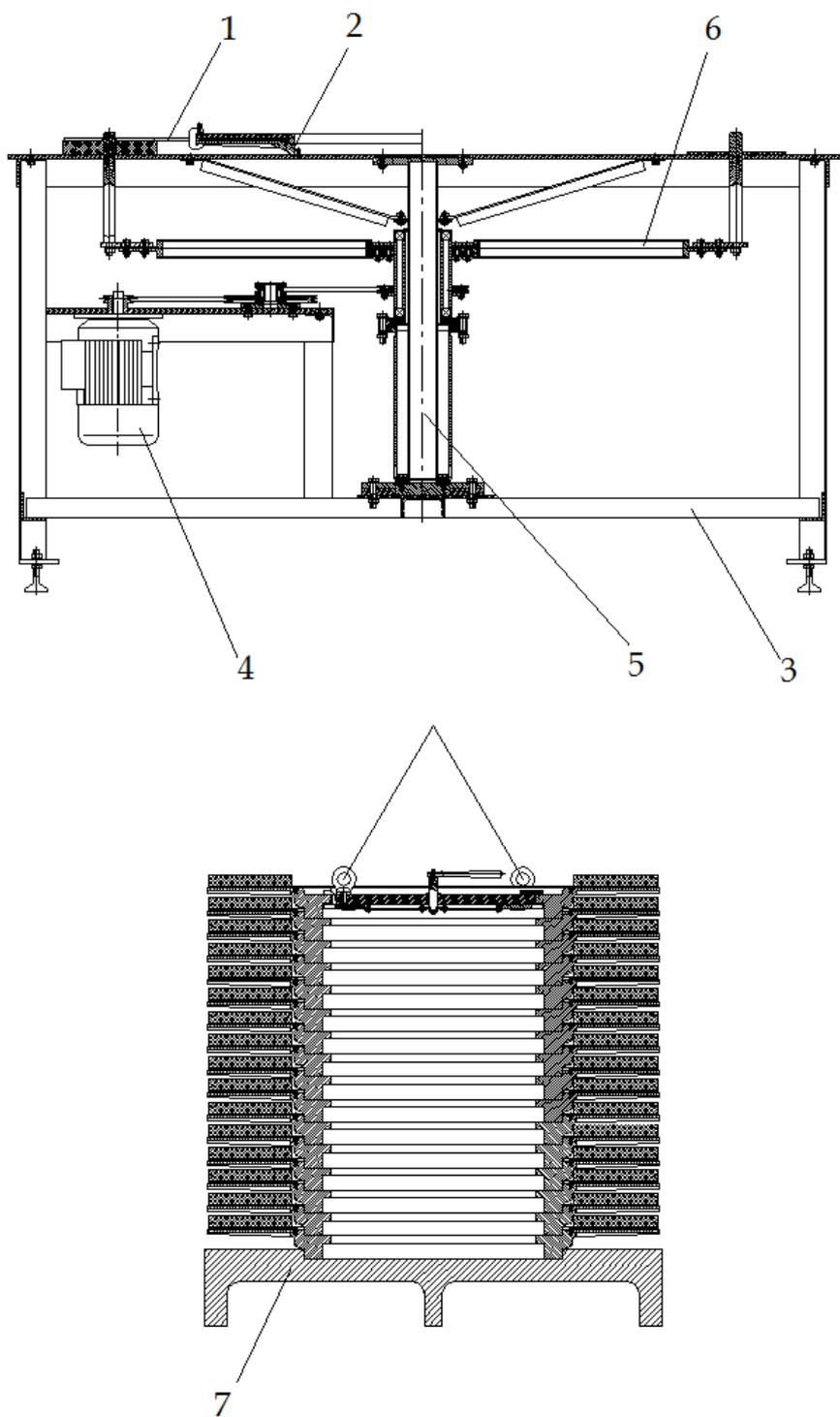


Рис. 35. Приспособление для намотки и штабель готовых индукторов
 1- Лента сплава 2НСР шириной 5 мм, 2-Подставка для намотки, 3- Рама
 стенда, 4- Привод вращения механизма намотки, 5- Ось вращения механизма
 намотки, 6- Механизм намотки, 7- Штабель готовых индукторов

Размеры индукторов: наружный диаметр 1000 мм, внутренний диаметр 630 мм. В ИЯФ собирался пакет, состоящий из 5 блинов, обеспечивая суммарную ширину индуктора 25 мм. Для установки одного блина на другой использовались магниты, используемые в магнитоэрозивных насосах МНД. Между блинами прокладывалась лакоткань толщиной 0.2 мм в два слоя.

Площадь поперечного сечения индуктора составляет:

$$S = K_3 \frac{(D - d)}{2} \cdot b = 3.237 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Где D- наружный диаметр индуктора, d- внутренний диаметр индуктора, b- ширина индуктора 25 мм, $K_3 = 0.7$ – коэффициента заполнения при намотке, с учетом высоты микронеровностей на поверхности и толщины изоляции (3-4 мкм на сторону).

Рабочее напряжение на секции индуктора, исходя из перепада индукции $dB = 2.5$ Тл, длительности импульса (с учетом его фронта и среза) $\tau = 3.8 \cdot 10^{-7}$ с, составит: $U = \frac{BS}{\tau} = 21.3$ кВ. Конструкция индуктора представлена на Рис. 36.

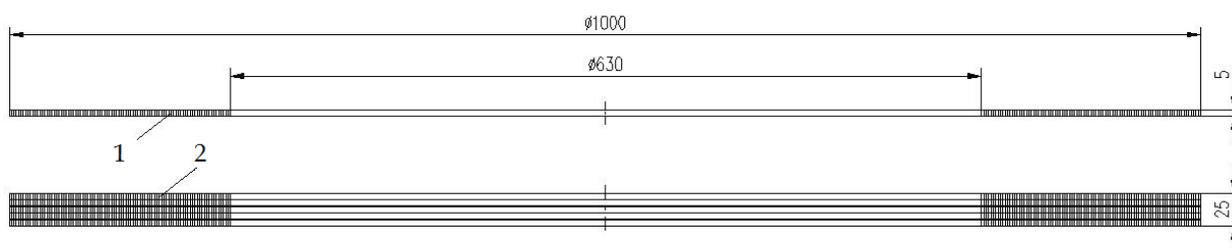


Рис. 36. Индуктор

1- Заготовка индуктора толщиной 5 мм, 2- Готовый индуктор толщиной 25 мм

6.2. Кожух индуктора

Кожух индуктора выполняет функцию обмотки возбуждения. С одной стороны он крепится к корпусу индуктора с другой через разъемы к импульсному источнику модулятору. Крепление к разъемам осуществляется с помощью гибких контактов установленных на объемном витке кожуха. В одном корпусе устанавливается четыре типоразмера кожухов для возможности последовательной сборки каждого из них. По контуру основания сделаны 12 вырезов под разъемы. Кожух индуктора показан на Рис. 37. Для установки индукторов в корпус использовалось приспособление, с поворотными опорами показанное на Рис. 38.

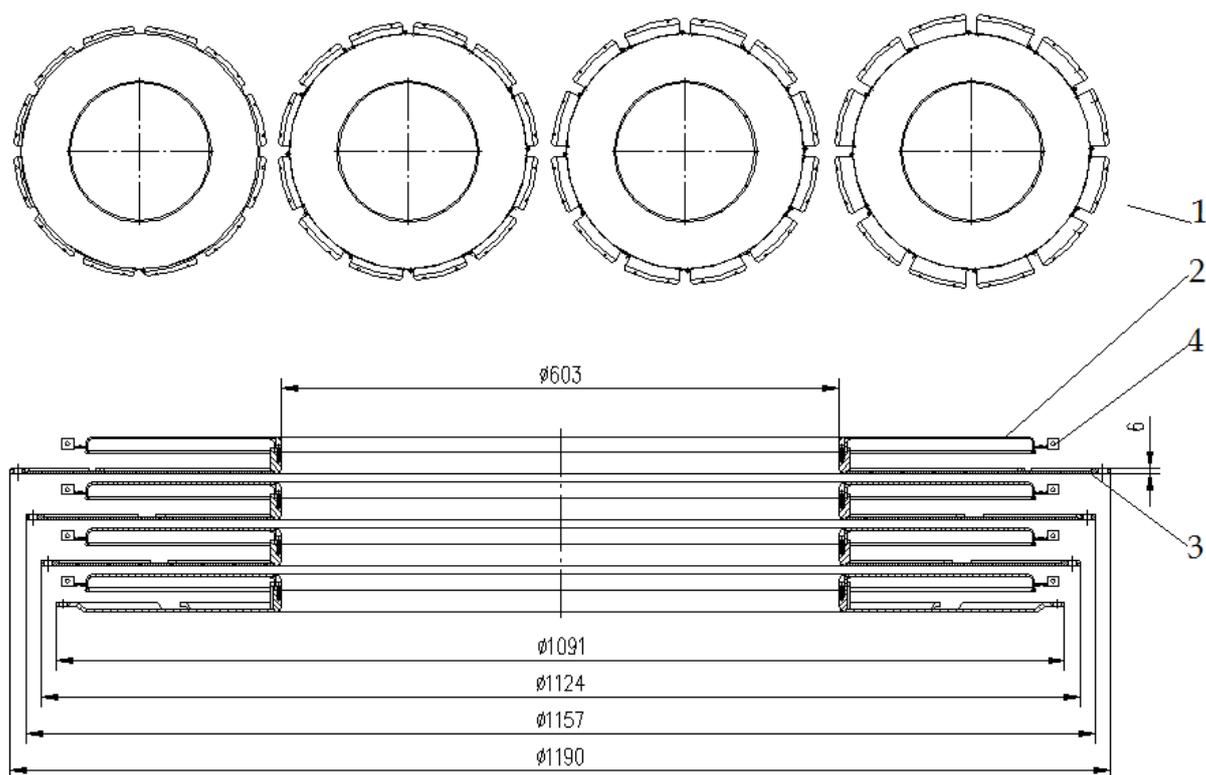


Рис. 37. Кожух индуктора

1- Четыре типоразмера кожухов индуктора устанавливаемых в один корпус индуктора, 2- Объемный виток, 3- Основание кожуха индуктора, 4- Гибкий контакт

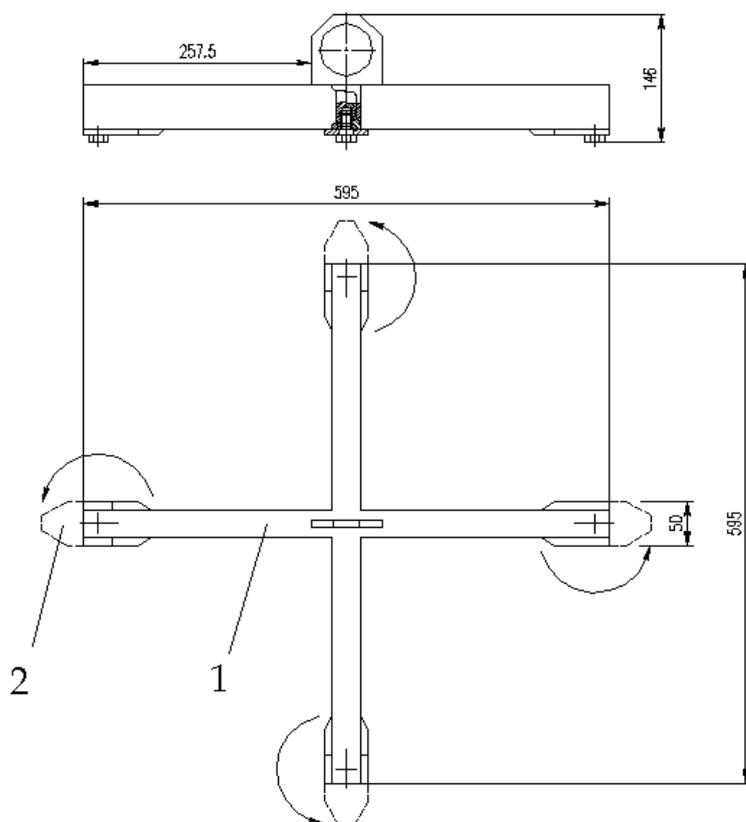


Рис. 38. Приспособление для установки кожухов индукторов в корпус
1- Крестовина, 2- Поворотная опора

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. Минимальные зазоры между фокусирующим электродом и анодом пушки, катодным держателем и фланцем изолятора составляют 8 см для напряжения 1 МВ. 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. Схема соединения кожуха индуктора с ускорительной трубкой показана на Рис. 39.

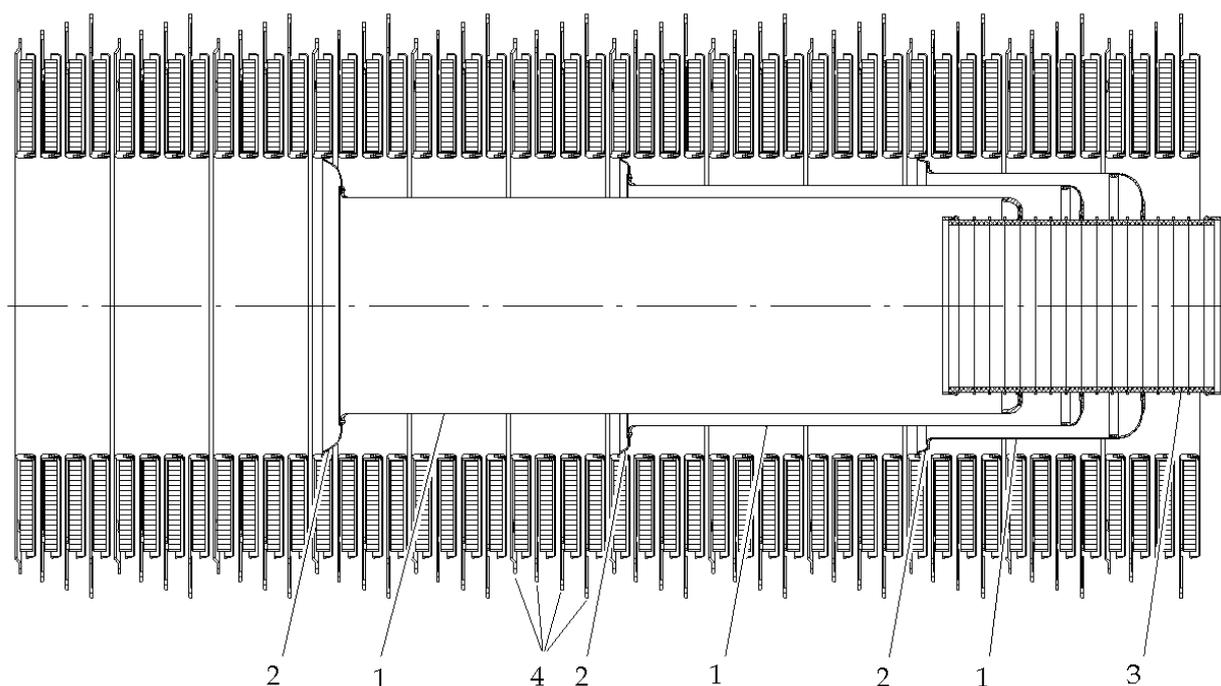


Рис. 39. Соединение кожухов индуктора с ускорительной трубкой
 1- Электроды, 2- Опорные контакты электродов, 3- Ускорительная трубка, 4-
 Комплект кожухов расположенный в одном корпусе индукторов

6.3. Корпус индуктора

Корпус индуктора, рассчитанный и испытанный на избыточное давление 2.5 кгс/см^2 , представляет собой сварную конструкцию. После сварки корпус отжигается при температуре $350 \text{ }^\circ\text{C}$ для снятия напряжений. Далее проводится обработка посадочных мест для кожухов индукторов и поверхностей, используемых для сборки корпусов на основании инжектора. Посадочные места для 48 вводов обрабатываются до сварки.

Так как по длине корпуса необходимо предусмотреть места для расположения разъемов, фланцы для крепления корпусов между собой сделаны из секторов. Конструкция корпуса показана на Рис. 40.

Для выставки корпусов по высоте в опорах изготовлены резьбовые отверстия.

На выходе пучка из центрального корпуса располагается корпус индуктора с установленной в нем корректирующей катушкой. Этот корпус индукторов длиннее, чем остальные на 50 мм (Рис. 41). Комплект корпусов для 1 МэВ состоит из 12 корпусов индукторов. С одной стороны они крепятся к центральному корпусу, с другой устанавливается крышка, к внутренней поверхности которой подсоединяется кожух, замыкающий объем (Рис. 42) в который подается элегаз под давлением 0.7 ати.

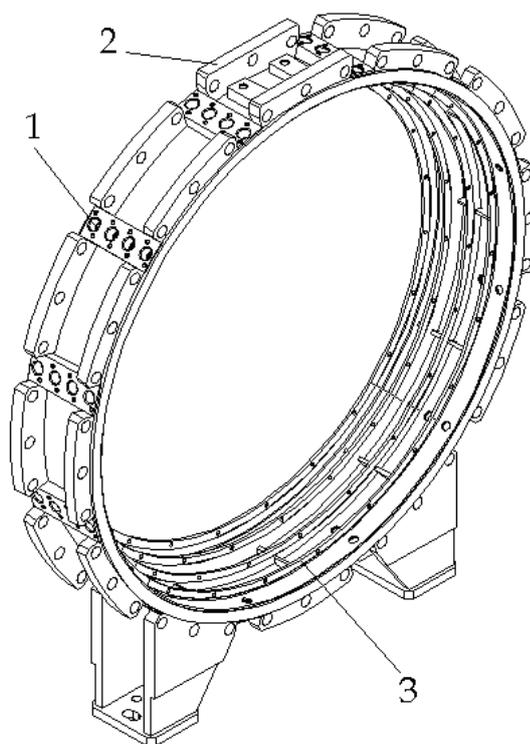


Рис. 40. Корпус индуктора

1- Посадочное место под разъем 50 Ом, 2- Юстировочная поверхность для контроля выставки корпусов, 3- Опорная поверхность для кожуха индуктора

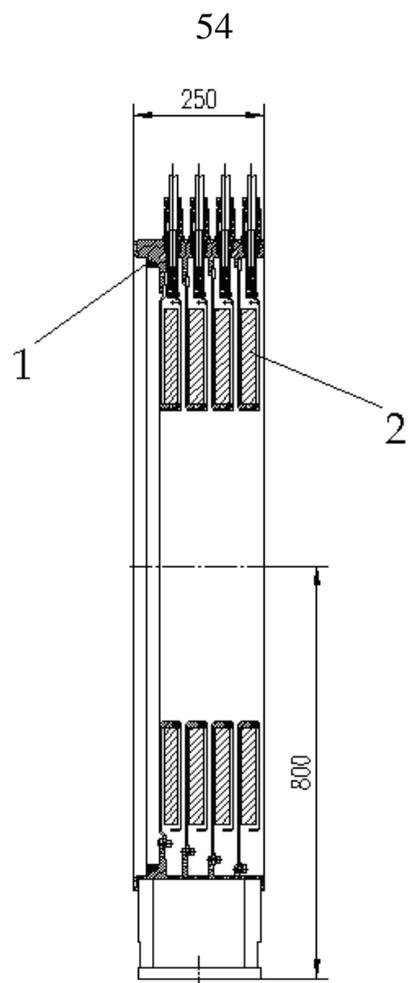


Рис. 41. Корпус индуктора для установки корректирующей катушки
1- Посадочное место корректирующей катушки, 2- Индуктор

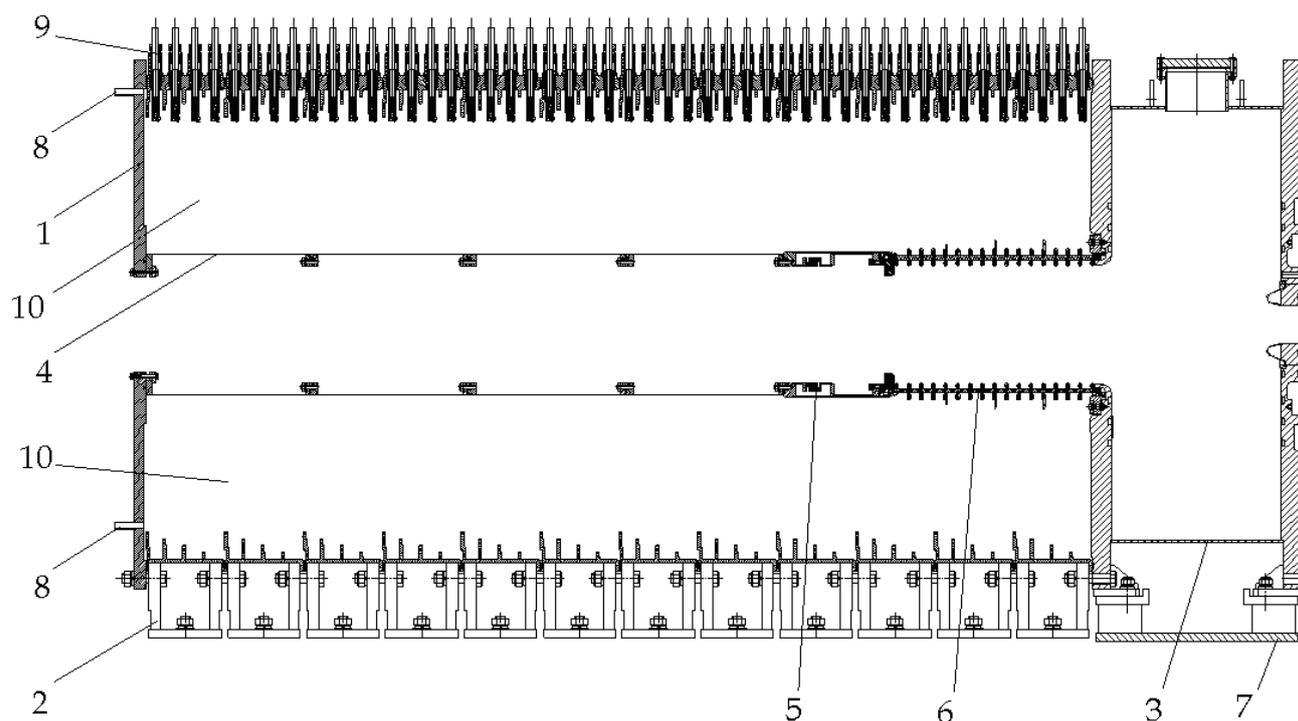


Рис. 42. Газовый объем инжектора

1- Крышка, 2- Корпус индуктора, 3- Центральный корпус, 4- Кожух, 5- Сильфонный узел, 6- Ускорительная трубка, 7- Опора центрального корпуса, 8- Штуцера подвода элегаза, 9- Ввод 50 Ом, 10- Объем заполненный элегазом под давлением 0.7 кгс/см^2

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. Контроль давления обеспечивается манометрами ДА 2018У2. Для заполнения ускорителя используется один баллон элегаза объемом 40 л.

ГЛАВА 7

Система измерений параметров пучка

Система измерений предназначена для измерения и оперативного контроля основных параметров электронного пучка, а именно, энергии и тока пучка, его поперечного положения и размера на входе в мишенный узел. Ток пучка измеряется двумя импульсными трансформаторами тока. Первый из них расположен в первой секции второй ускоряющей трубки. Вторым трансформатором расположен на входе в мишенный узел. Временная зависимость поперечного положения и тока пучка измеряется посредством широкополосного полоскового датчика (далее - пикапа) непосредственно на входе в мишенный узел. Сразу за пикапом расположен цилиндр Фарадея, который может перекрывать и полностью поглощать электронный пучок, измеряя при этом полный заряд пучка за импульс.

Предусмотрено также измерение напряжения на каждом из модуляторов с последующей математической обработкой и суммированием сигналов. При отклонении напряжения на одном из модуляторов от нормы, предусмотрен запрет на последующий выстрел.

7.1. Датчик положения пучка

Полосковый датчик положения пучка, расположенный на выходе ускорителя, представляет собой магнитоиндукционный датчик. В нем проводник образует виток, в котором возникает электродвижущая сила, благодаря изменению потока магнитного поля, создаваемого движущимся

пучком. Азимутальное распределение магнитного поля тока пучка дает информацию о токе и поперечном положении центра тяжести пучка. Измеряя сигналы с четырех линий (Рис. 43) S1-S4, можно определить смещение центра тяжести пучка относительно оси вакуумной камер по формулам (для малых ΔX и ΔY):

$$\Delta Y = \frac{S1 - S3}{2(S1 + S3)} \cdot R, \quad \Delta X = \frac{S2 - S4}{2(S2 + S4)} \cdot R.$$

Здесь R – радиус вакуумной камеры. Разностный и суммарный сигнал формируется с помощью специальных мостовых трансформаторов и оцифровывается с помощью быстрого АЦП.

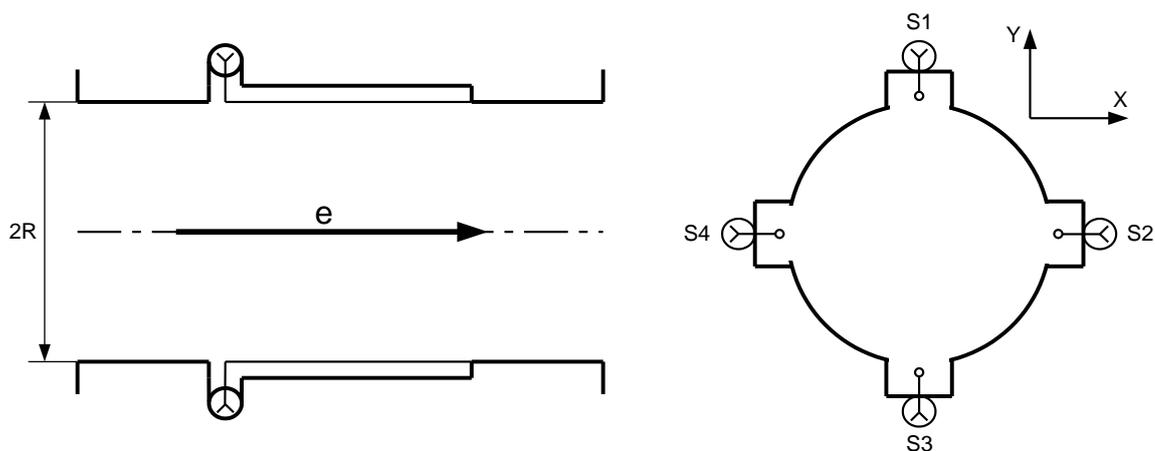


Рис.43. Схематичное изображение полоскового датчика положения пучка

Величину полного тока можно вычислить по измеренным суммарным сигналам $S1+S3$ и $S2+S4$ по формулам:

$$I = K \frac{(S1 + S3) \cdot (S2 + S4)}{(S1 + S3) + (S2 + S4)}$$

Здесь K – калибровочный коэффициент.

Калибровка датчика путем возбуждения его проводником с током, расположенным по центру датчика, показала, что погрешность определения

смещения составляет $<0.7\text{мм}$, а коэффициент $K=275\pm 5\%$. Спад вершины импульсов с выходов дифференциальных трансформаторов составляет $\sim 27\%$ при длительности импульса 300нс [14].

Фотографии пикапа и мостовых трансформаторов представлены на Рис. 44.

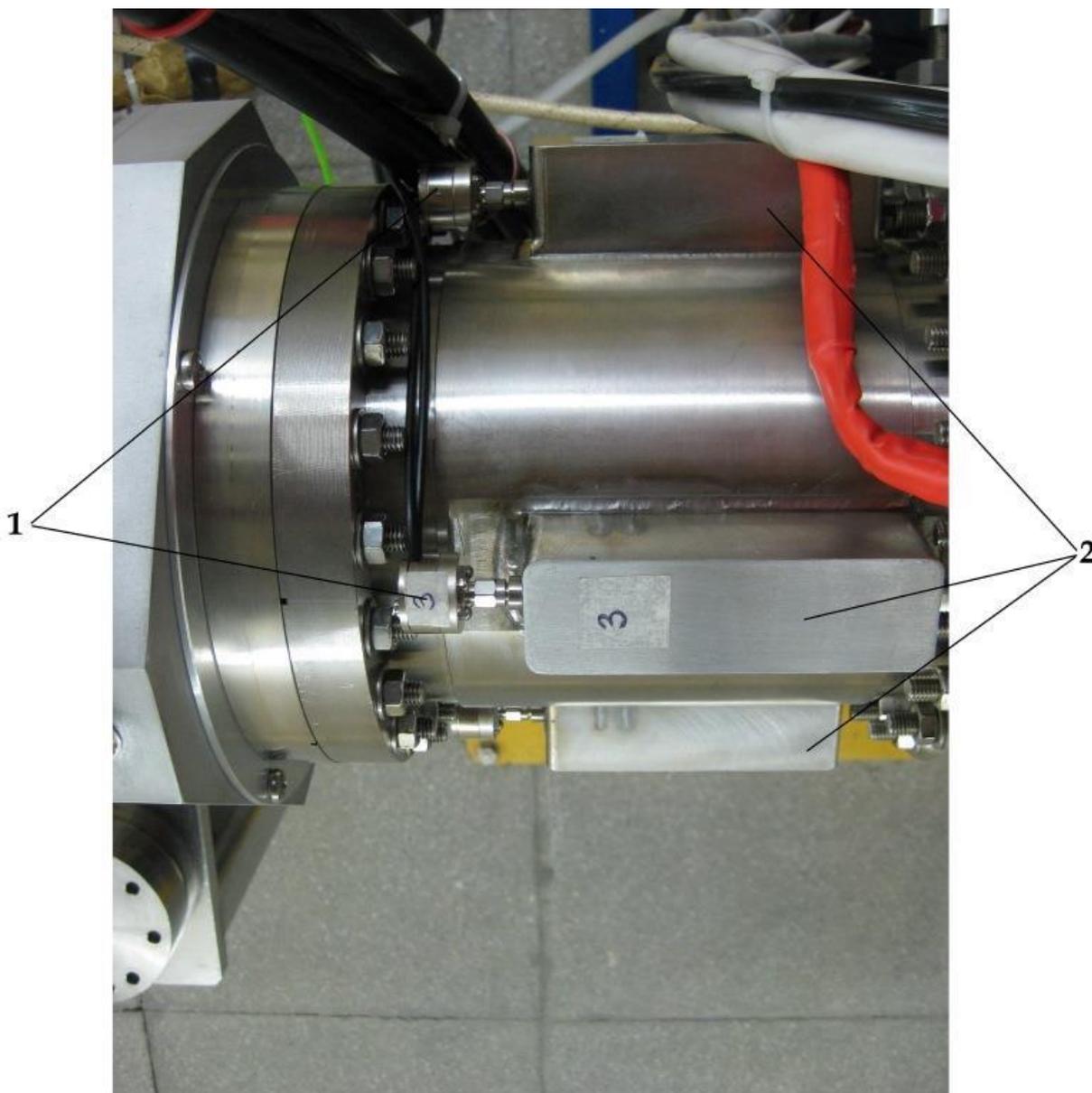


Рис.44. Пикап и мостовые трансформаторы системы измерения положения пучка

1- Корпус пикап электрода, 2- Трансформатор мостовой

Датчик положения пучка представляет собой фрагмент вакуумной камеры (Рис. 45), внутри которой под углом 90° по азимуту расположены 4 пикап линии, изготовленные из проволоки диаметром 2 мм нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Каждая пикап линия имеет свой выход на мостовой трансформатор через резистор, расположенный внутри корпуса пикап линии.

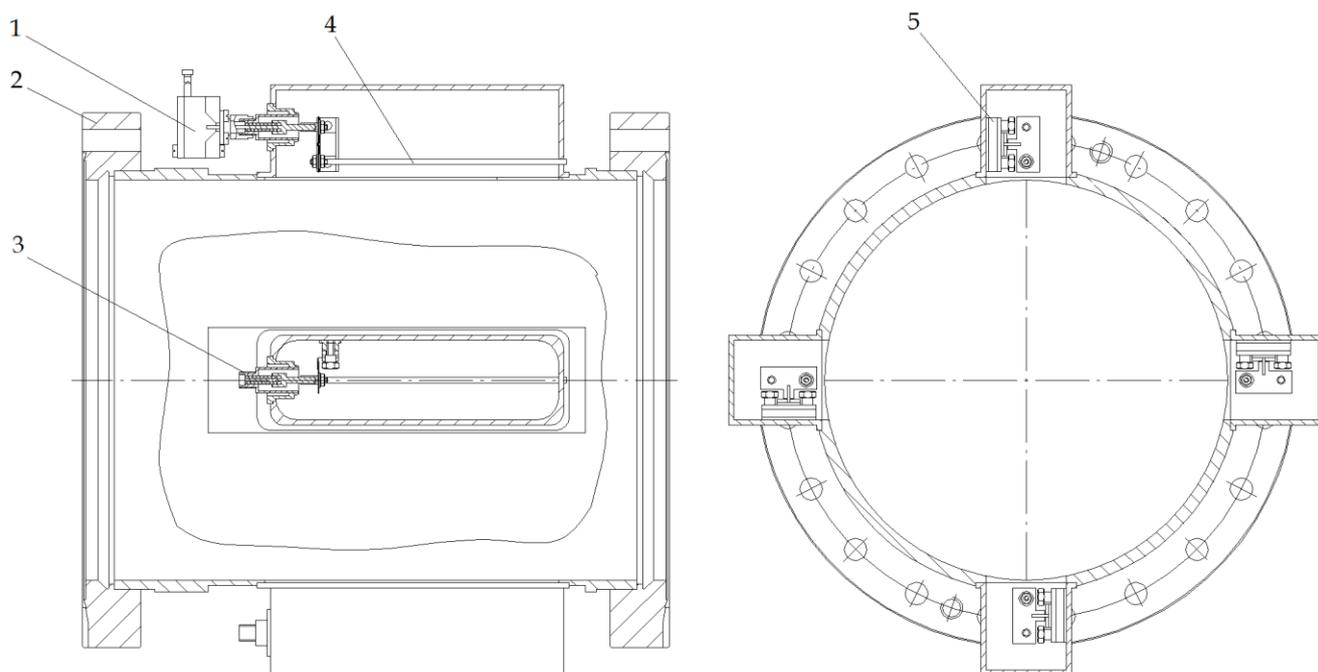


Рис. 45. Датчик положения пучка

1- Трансформатор мостовой, 2- Фланец для соединения с вакуумной камерой, 3- Разъем для трансформатора, 4- Пикап линия, 5- Резистор

7.2. Трансформатор тока

Для измерения тока пучка используются два импульсных трансформатора тока. Первый установлен на выходе пучка из анода и необходим для измерения тока пучка, ускоренного в вакуумном диоде, а второй на входе пучка в мишенный узел.

Опорный диск катушки первого трансформатора тока (Рис. 46)

устанавливается на центральном корпусе. Соосность катушки с осью пучка электронов обеспечивается точностью обработки посадочных мест в центральном корпусе и на опорном диске трансформатора тока. Для получения достаточной величины индуктивности трансформатора использовался ферромагнитный сердечник из аморфного сплава 5БДСР. Размеры магнитопровода 591x579x15 мм (наружный диаметр x внутренний диаметр x высота). Количество витков $W=100$, сопротивление нагрузки $R_n=1$ Ом. Для демпфирования колебаний, возникающих из-за неоднородности намотки и неоднородности экранирования обмотки трансформатора, витки обмотки шунтированы резисторами $R_d=1$ кОм как показано на Рис. 47.

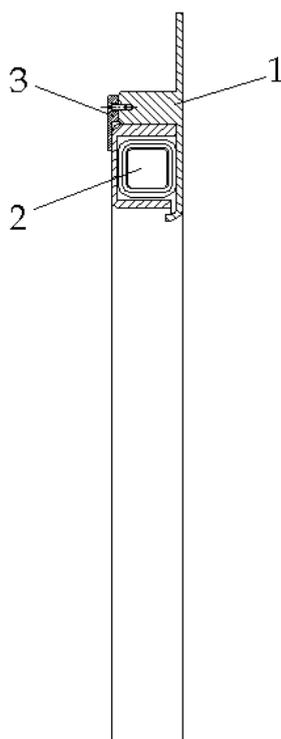


Рис. 46. Трансформатор тока на выходе пучка из анода

1- Опорный диск, 2- Катушка, 3- Прижим

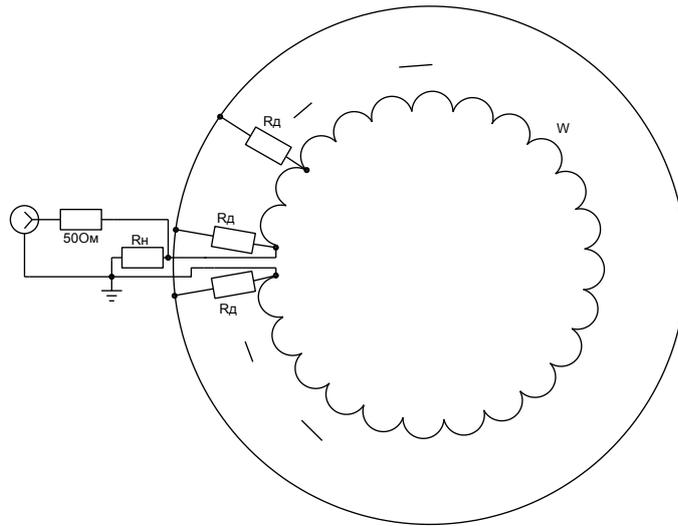


Рис.47. Схема трансформатора тока инжектора

Аналогичную схему имеет трансформатор тока, установленный на выходе инжектора перед цилиндром Фарадея. На Рис. 48 показан чертеж этого трансформатора.

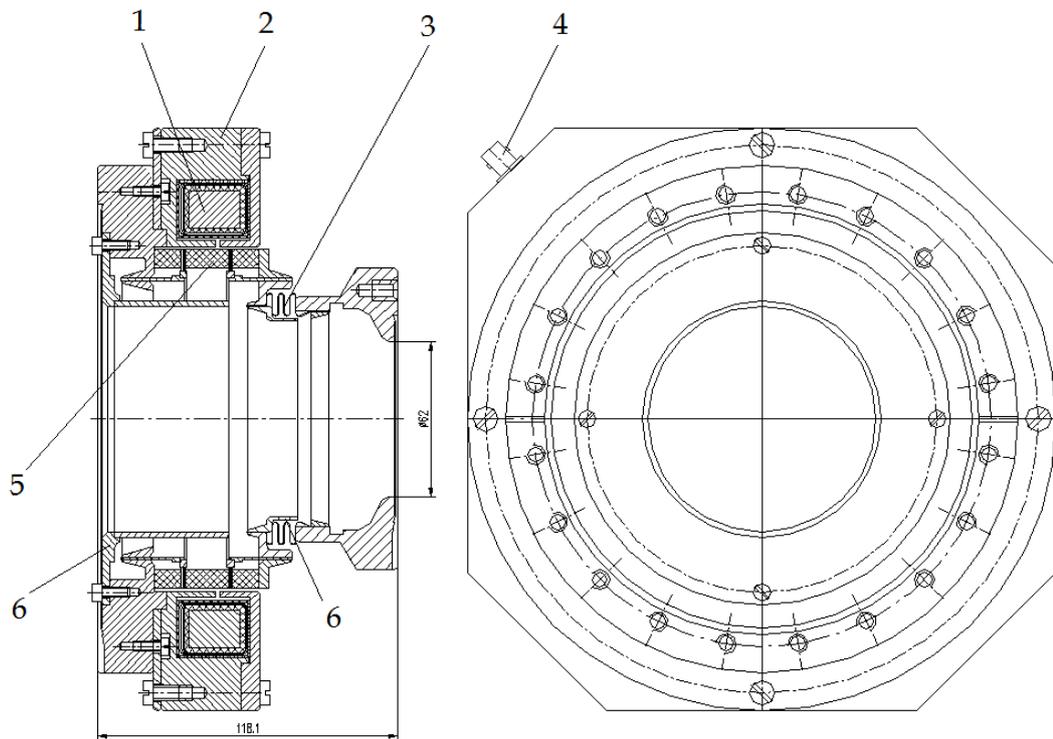


Рис. 48. Трансформатор тока на входе пучка в мишенный узел

1- Катушка, 2- Корпус трансформатора, 3- Сильфонная развязка, 4- Электрический разъем, 5- Изолятор, 6- Экран

Трансформатор тока на входе пучка в мишенный узел представляет собой катушку установленную в корпус. Корпус трансформатора имеет посадочную поверхность для установки на фланец вакуумной камеры. Чтобы избежать механической нагрузки на изолятор трансформатора от веса цилиндра Фарадея предусмотрена сильфонная развязка. Внутри трансформатора установлены защитные экраны.

Коаксиальная конструкция этого трансформатора вместе с малоиндуктивной конструкцией нагрузочного резистора позволила получить время нарастания выходного сигнала около 10 нс.

Калибровка трансформаторов тока на стенде дала следующие значения для коэффициентов передачи (трансформаторы подключены к 50 Ом входу осциллографа кабелем длиной 2м):

Трансформатор тока диода – $K_d = 200 \pm 1\%$

Трансформатор тока пучка на выходе инжектора – $K_p = 218 \pm 1\%$

Спад вершины импульса длительностью 300нс на выходе измерительных трансформаторов не превышает 0.1%.

7.3. Узел координатный

Узел координатный (Рис. 49) представляет собой цилиндр Фарадея, он расположен сразу за датчиком положения пучка и может перекрывать и полностью поглощать электронный пучок, измеряя при этом полный заряд пучка за импульс.

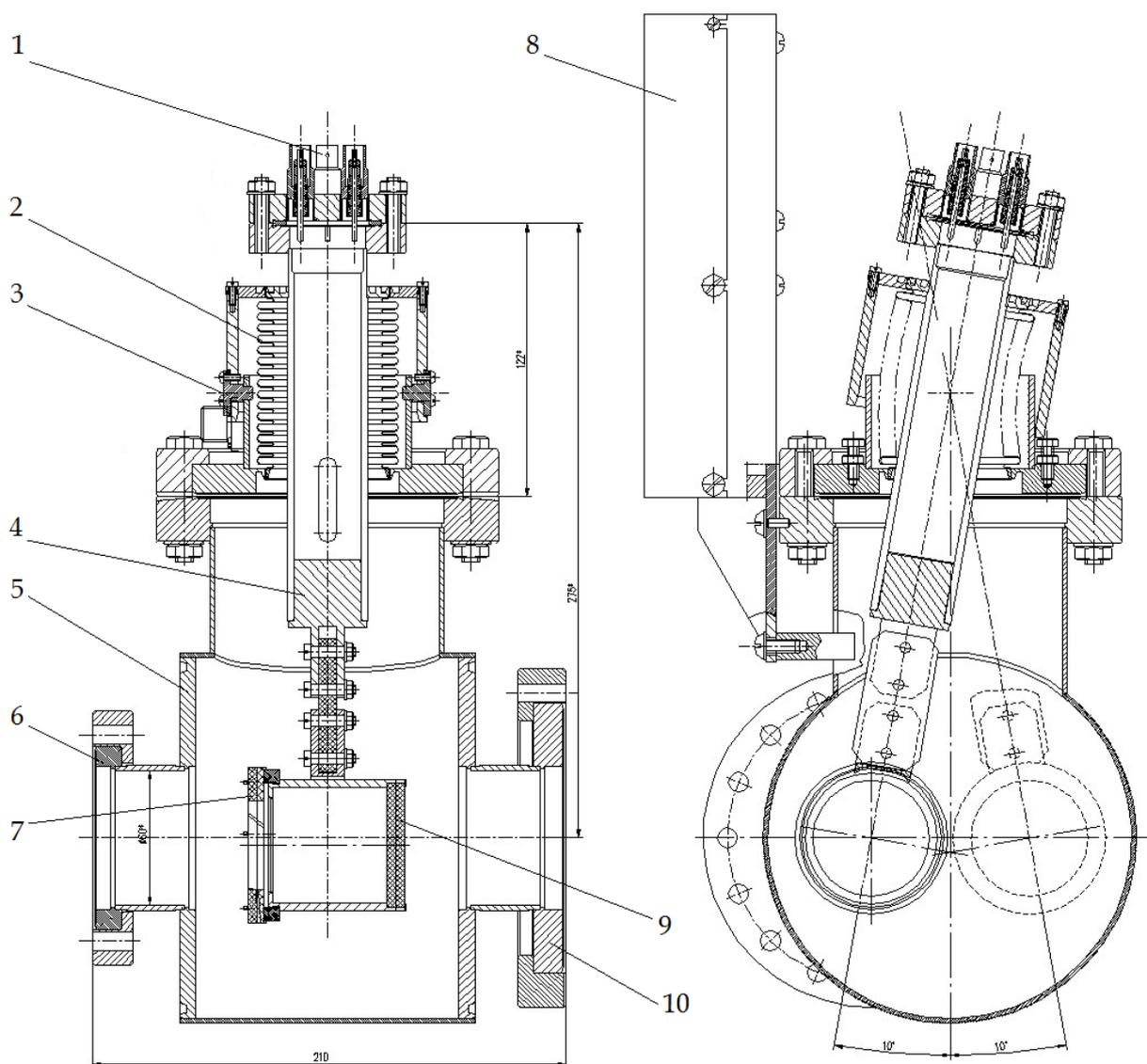


Рис. 49. Узел координатный

1- Электрические разъемы, 2- Сильфон, 3- Ось вращения, 4- Рычажный механизм, 5- Корпус, 6- Фланец для сборки с трансформатором тока, 7- Боковая ламель, 8- Узел привода вращения, 9- Центральная ламель, 10- Фланец для сборки с шибером

Цилиндр Фарадея имеет специальную конструкцию, состоящую из трех независимых приемников пучка – графитовых ламелей (Рис. 50). Сигнал с каждой из ламелей выводится из вакуумного объема через герметичные высокочастотные разъемы. По величине сигналов с периферийных ламелей

можно оценивать качество фокусировки и несимметричность пучка относительно оси системы. Ток с разъемов цилиндра Фарадея измеряется трансформаторами тока.

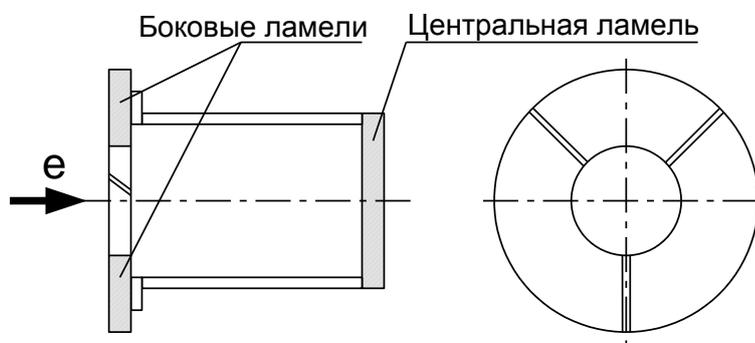


Рис.50. Эскиз ламелей цилиндра Фарадея

В цилиндре Фарадея (Рис. 49) предусмотрен рычажный механизм смещения датчиков с оси пучка. Рычажный механизм фиксируется на осях вращения механизма установленных в корпусе цилиндра Фарадея. Узел вращения имеет сильфон, который обеспечивает возможность поворота и сохраняет вакуум внутри корпуса.

7.4. Делители напряжения индукторов

Емкостные делители напряжения позволяют измерять напряжение на входе индукторов. Делители изготовлены в лаборатории 5-1 ИЯФ СО РАН и представляют собой две ветви по 10 последовательно включенных керамических конденсаторов поверхностного монтажа с диэлектриком типа NP0. Конденсаторы спаяны встык и расположены в пазах капролонового стержня. Для устранения возможных разрядов по поверхности конденсаторы залиты кремнийорганическим компаундом “Виксинт”. Суммарная емкость плеча составляет 30 пФ. Фотография делителя в защитной трубке и без нее

представлена на Рис. 51. На Рис. 53 показан вид пары делителей, установленных в высоковольтные вводы индукторного модуля.

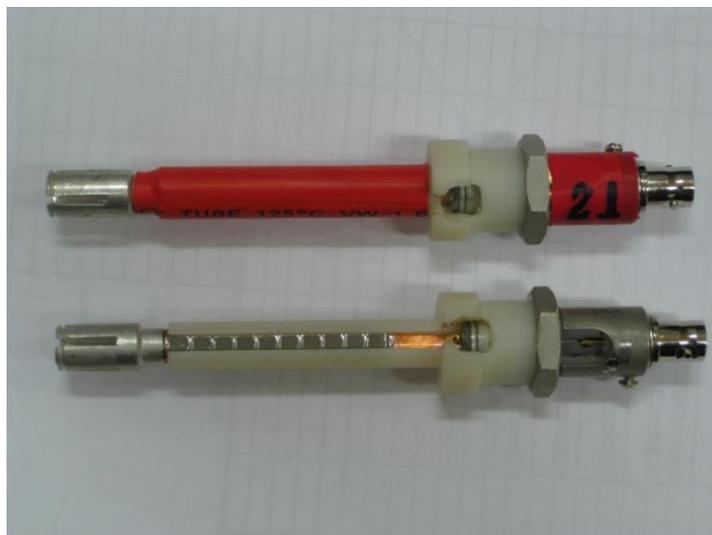


Рис.51. Емкостной делитель напряжения индуктора

В корпусе индуктора устанавливается два емкостных делителя на два средних индуктора. Контроль ускоряющего напряжения на каждом индукторе происходит при сравнении поступающих с делителей значений напряжения. Они должны совпадать с хорошей точностью.

По сумме входных напряжений индукторов можно определить выходное напряжение на ускоряющей трубке. Сложение сигналов с индукторных делителей реализовано программно. Результирующее напряжение на ускоряющей трубке доступно в системе управления ускорителем.

7.5. Емкостной делитель напряжения в вакуумном диоде

Полное напряжение на вакуумном диоде может быть измерено независимо с помощью емкостного делителя напряжения. Было спроектировано два емкостных делителя. Оба делителя устанавливаются на

экране корпуса. Площадь первого делителя $S_1=1843 \text{ мм}^2$, второго $S_2=21412 \text{ мм}^2$.

Верхнее плечо первого датчика представляет собой электрод сферической формы, установленный в вакуумном объеме диода (Рис. 52). Нижнее плечо датчика ($C=6.7 \text{ нФ}$) установлено на внешней поверхности центрального корпуса непосредственно на вакуумном выводе. Искажения формы импульса, связанные с отражениями от конца линии восстанавливаются математически с точностью $\pm 2\%$.

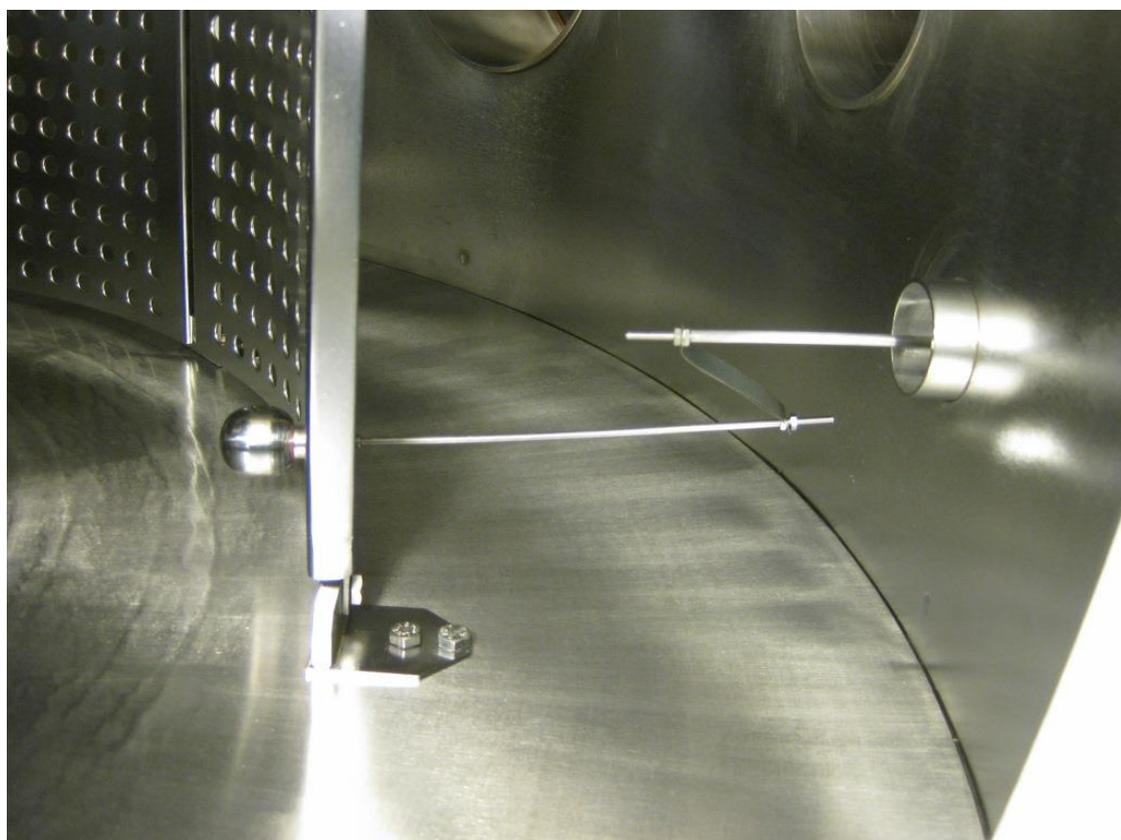


Рис.52. Емкостной датчик напряжения вакуумного диода в центральном корпусе

Емкостной датчик 1 устанавливается в одно из отверстий экрана центрального корпуса (Рис. 53). Крепление сделано через керамические детали для изоляции датчика от экрана.

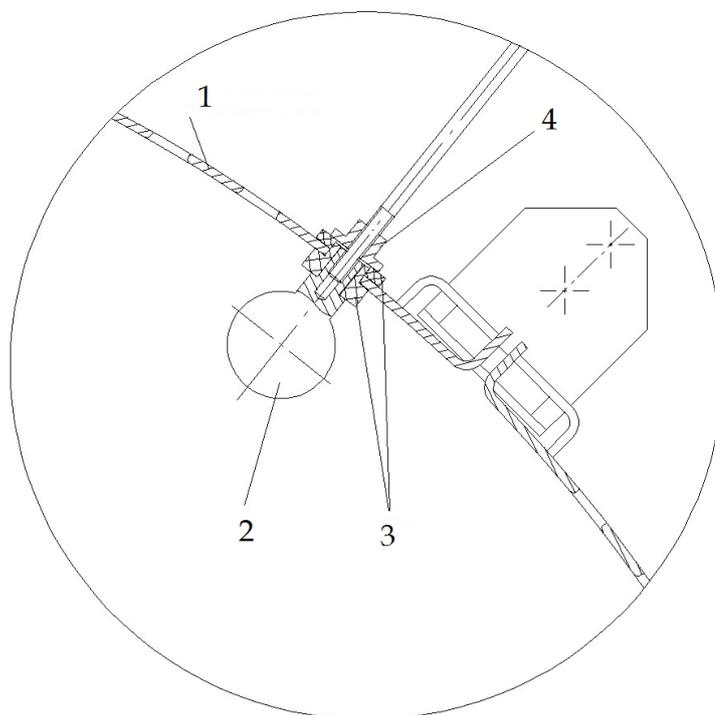


Рис. 53. Емкостной датчик 1

1- Экран центрального корпуса, 2- Электрод сферической формы, 3-
Керамические детали, 4- Гайка

Электрод емкостного датчика 2 выполнен в виде пластины обработанной по радиусу и крепится на двух отверстиях экрана центрального корпуса (Рис. 54). Так как экран загнут по радиусу, то сложно определить точное положение отверстий для крепления датчика. Для возможности сборки датчика на любом из экранов центрального корпуса разъемы крепления датчика выполнены в виде шарниров. Оси вращения шарниров расположены перпендикулярно по отношению друг к другу.

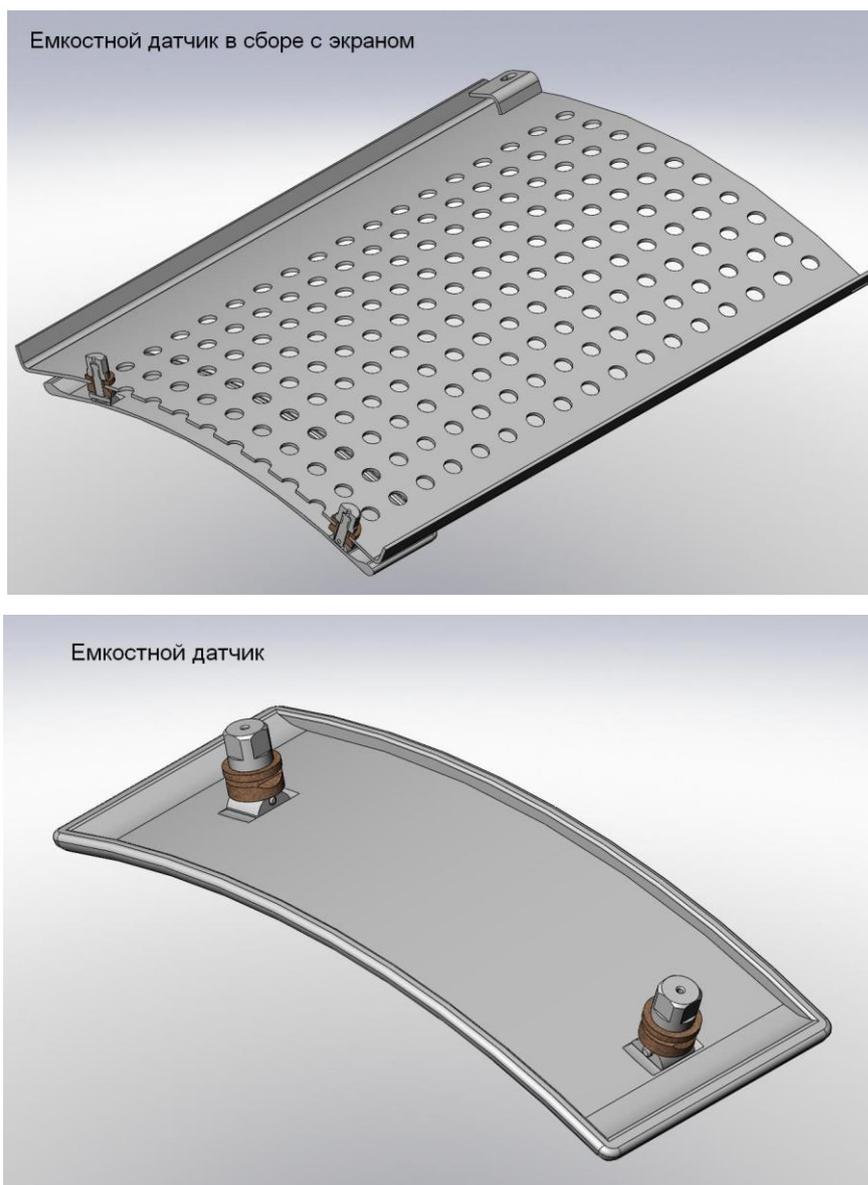


Рис. 54. Емкостной датчик 2

ГЛАВА 8

Мишенный узел

Одним из основных параметров пучка является его размер на мишени. Оценить этот размер можно по отпечатку пучка на мишени.

Мишенный узел (Рис. 55) предназначен для прецизионной фокусировки электронного пучка на мишень - конвертор и формирования рентгеновского излучения максимальной интенсивности в нужном телесном угле.

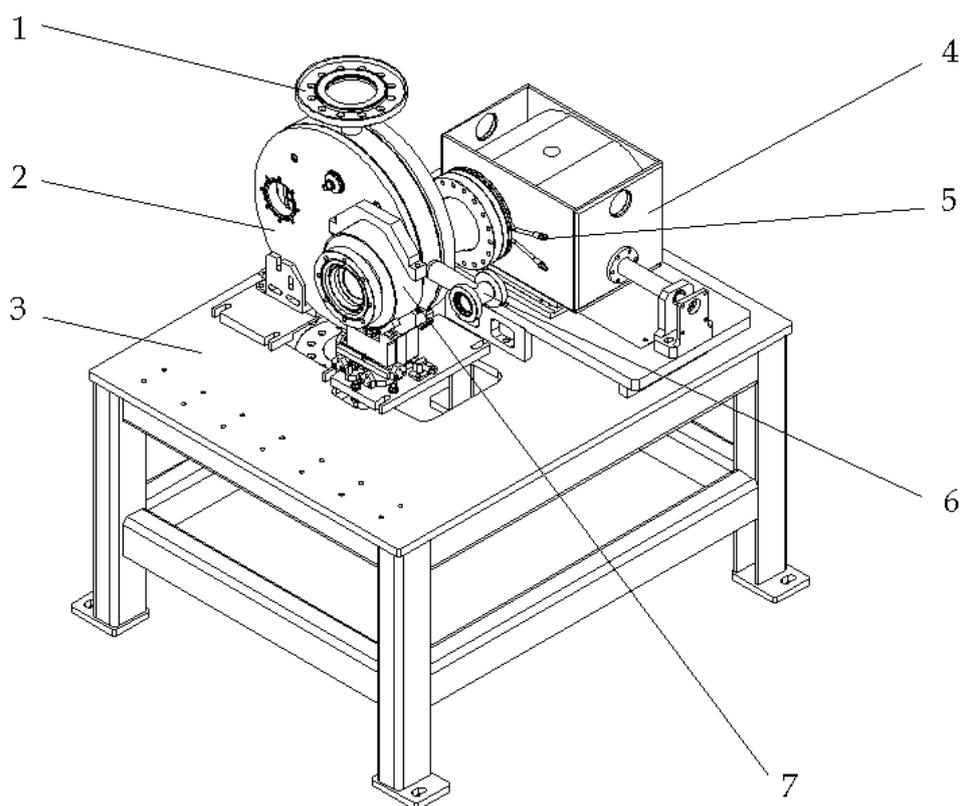


Рис. 55. Мишенный узел

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

Мишенный узел отделен от ускорителя вакуумным шибером 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.

8.1. Корпус

Корпус (рис. 56) представляет собой вакуумный объем, в котором размещена мишень. Мишень изготовлена из танталовой пластины размером 0.4x14x48 мм. Толщина пластины-мишени может быть от 0.4 до 1.2 мм. Пластины фиксируются на ободе колеса, всего установлено 18 пластин. Для замены пластин предусмотрено окно, расположенное на диаметрально противоположной стороне корпуса относительно траектории пучка. Вращение колеса обеспечивается шаговым двигателем через магнитную подвеску. Встроенное в корпус вакуумное окно позволяет регистрировать отпечаток пучка на мишени. На выходе корпуса установлено охлаждение. Для откачки объема после замены мишени в корпусе есть два фланца для магниторазрядных насосов.

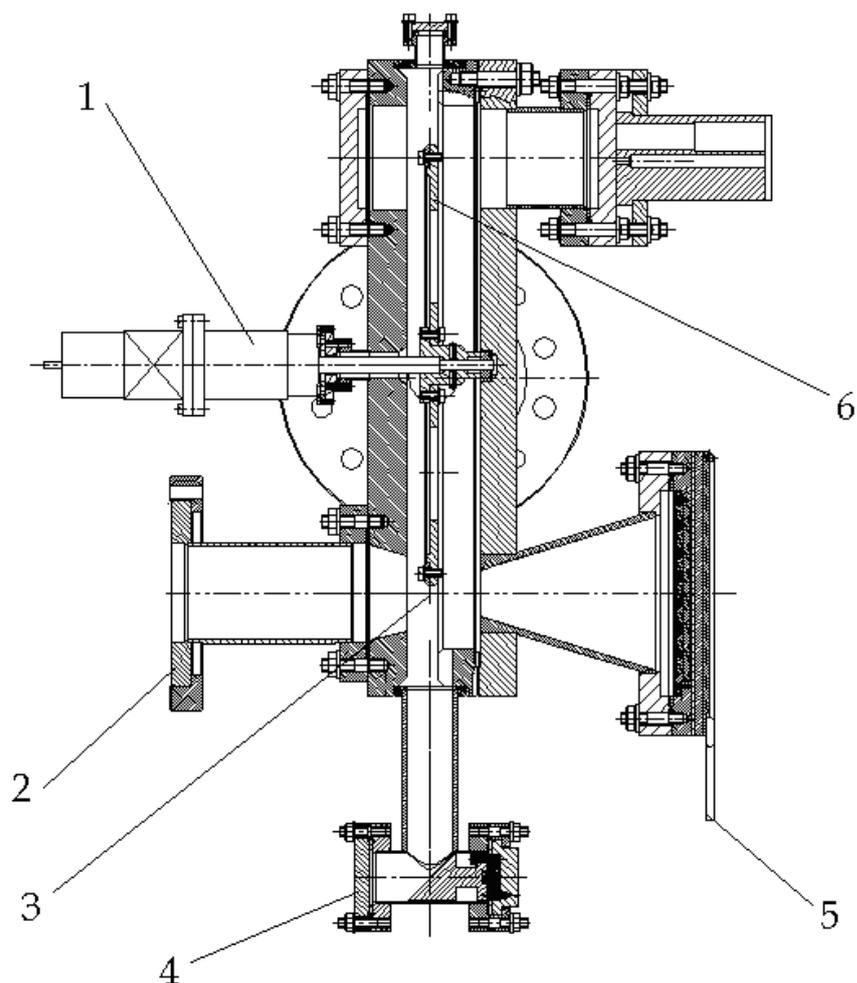


Рис. 56. Корпус

1- Привод вращения колеса, 2- Патрубок для подсоединения шибера, 3- Танталовая мишень, 4- Патрубок видеокамеры, 5- Охлаждение, 6- Колесо

8.2. Коллиматор

За корпусом мишени установлен коллиматор (Рис. 57). Он предназначен для формирования угла рентгеновского излучения 7 градусов. Коллиматор смонтирован на подвижной плите с приводом, обеспечивающим перемещение коллиматора в поперечном направлении. Коллиматор имеет два рабочих положения. Первое для формирования рентгеновского излучения, второе для принятия интенсивного электронного пучка при отсутствии мишени.

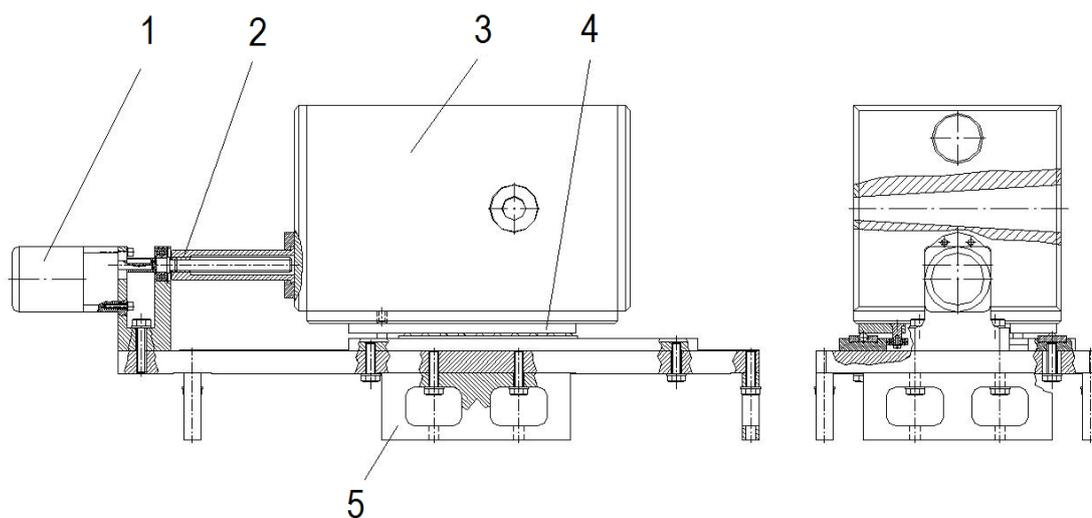


Рис. 57. Коллиматор

1- Привод вращения, 2- Винтовой механизм передачи поперечного перемещения, 3- Коллиматор, 4- Подвижная плита, 5- Опора коллиматора

8.3. Опора

Все элементы мишенного узла размещены на отдельном столе (Рис. 58). Для корпуса и последней фокусирующей линзы предусмотрены регулируемые опоры при помощи, которых линза и корпус выставляются по оси пучка.

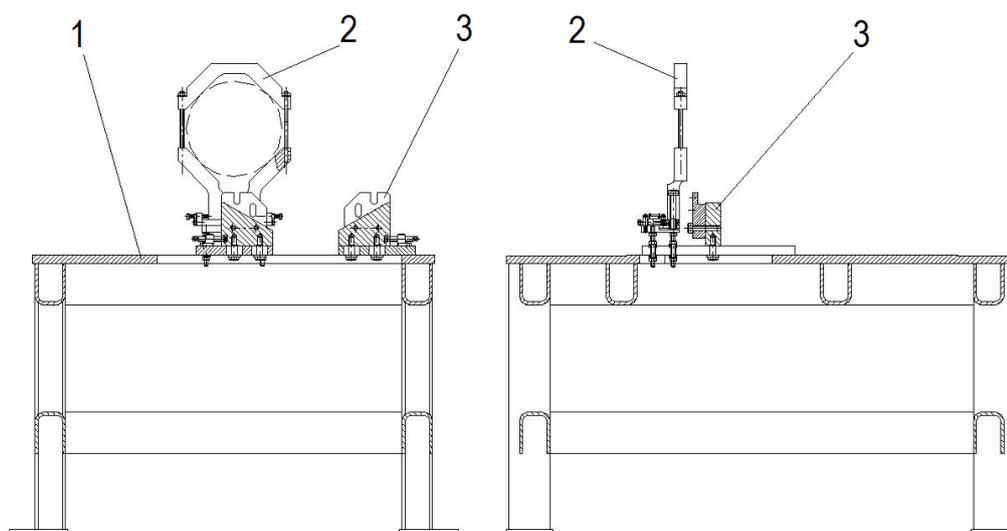


Рис. 58. Опора мишенного узла

1- Опора мишенного узла, 2- Опора линзы 2, 3- Опора корпуса

ГЛАВА 9

Импульсная система высоковольтного питания

Импульсная система предназначена для формирования на ускорительных секциях последовательности из двух импульсов напряжения прямоугольной формы. 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. Параметры системы в таблице 2.

Таблица 2

Полное ускоряющее напряжение	2 МВ
Напряжение на выходе одного модулятора	21 кВ
Ток на выходе одного модулятора	до 9 кА
Количество модуляторов	48 шт.
Число индукторов, запитываемых от одного модулятора	2 шт.
Зарядное напряжение на формирующей линии (ФЛ) модулятора	43 кВ
Длительность полки импульса	200 нс

На Рис.59 показаны основные элементы импульсной системы питания: зарядные устройства (ЗУ), модуляторы, размещенные в стойках (СМ) и кабельная линия.

Управление импульсной системой питания обеспечивается центральной стойкой, в которой выполняется синхронизация работы системы и диагностика

ее состояния. Высоковольтное питание модуляторов идет от двух зарядных устройств (ЗУ-1, ЗУ-2). Передача напряжения осуществляется по кабельной линии.

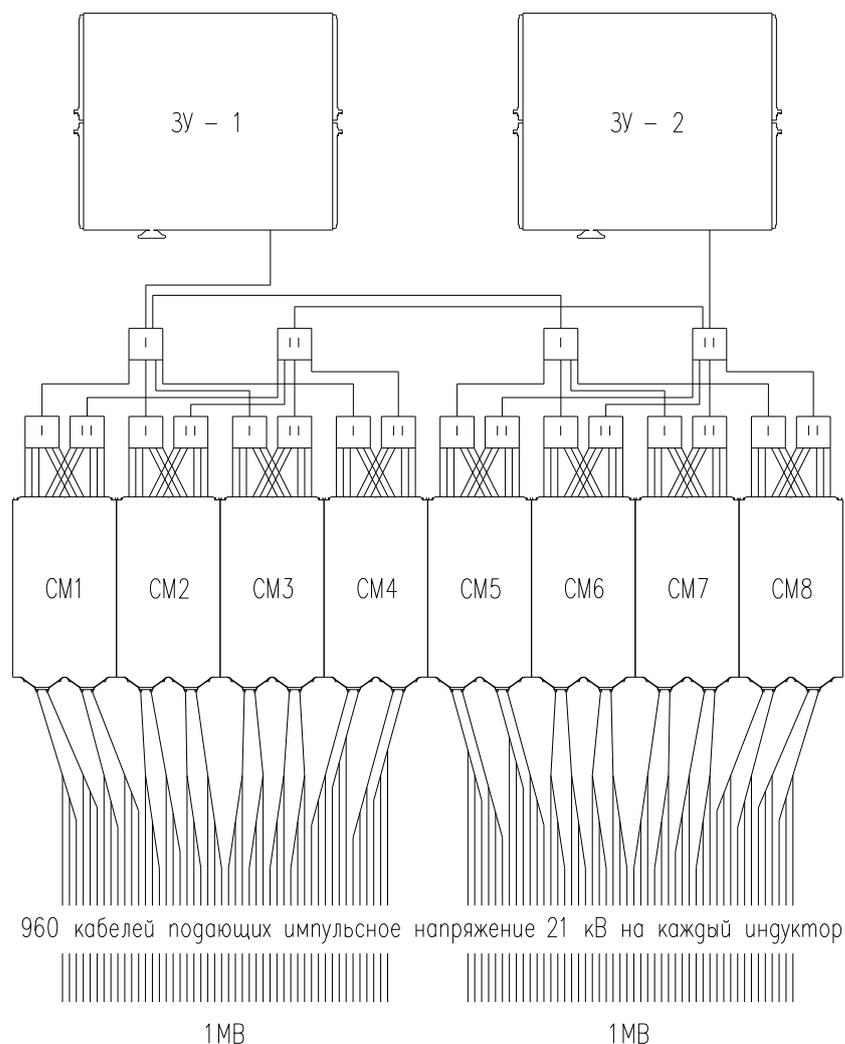


Рис. 59. Импульсная система высоковольтного питания

Каждый индуктор инжектора присоединяется к модулятору через десять 50-Омных кабелей равной длины для обеспечения согласования с сопротивлениями нагрузки. Таким образом, на каждый модулятор приходится 20 кабелей РК-50-11-13. Длина кабеля определяется расстоянием от модулятора до соответствующего индуктора и составляет 10 м, таким образом,

на каждый индуктор потребуется 100 м кабеля. Учитывая, что общее количество индукторов в инжекторе составляет 96 шт., общее необходимое количество кабеля составит $96 \times 100 = 9600$ метров. С учетом дополнительных расходов кабеля и отходов при раскрое потребовалось около 10 км кабеля РК-50-11/13.

9.1. Модуляторы

В основу системы зарядки формирующей линии модуляторов заложен принцип импульсного заряда. Общее число модуляторов на инжекторе составляет 48 шт.

Наиболее ответственными деталями модулятора являются высоковольтные конденсаторы и коммутирующие приборы - водородные тиратроны. Коммутатор выполняется на базе тиратрона ТПИ1-10К/50 с коммутируемым по паспорту током 10 кА и рабочим напряжением 50 кВ. Для исключения шунтирования индукторов на первом модуляторе при подаче импульса напряжения на индукторы от второго модулятора предусмотрено использование магнитного отсекающего вентиля. Имеются рекомендации разработчиков тиратронов типа ТПИ, в соответствии с которыми желательно сокращать время приложения к тиратрону пикового анодного напряжения до уровня не более 0.5 от времени заряда, но не более 1 мс. Это условие выполняется при заряде за 2 мс. Для заряда емкости 200 нФ формирующей линии до напряжения 50 кВ за 2 мс потребовалось использовать ключи на средний ток около 800 А. Для этой цели применили выпускаемые зарубежной промышленностью полупроводниковые управляемые ключи.

Для получения заданных параметров импульса напряжения, соединения формирующих линий с тиратронами выполнены шинами сложной формы (Рис. 61).

На Рис.60 и Рис.61 представлены конструкции модуляторов двух типов формирующих линий:

1- на основе конденсаторов К15-10

2- на основе конденсаторных секций с использованием пленочных диэлектриков.

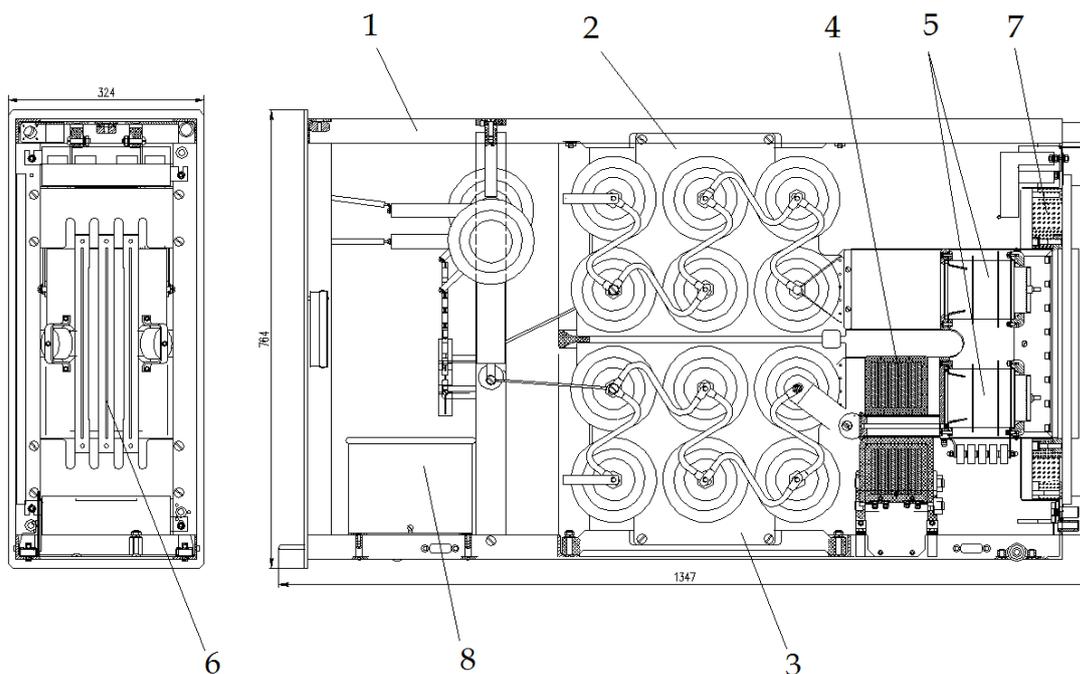


Рис. 60. Модулятор на базе конденсаторов К15-10

1- Каркас, 2- Первая формирующая линия, 3- Вторая формирующая линия, 4- Магнитный вентиль, 5- Тиратроны, 6- Блок разъемов, 7- Блок управления тиратроном, 8- Блок размагничивания

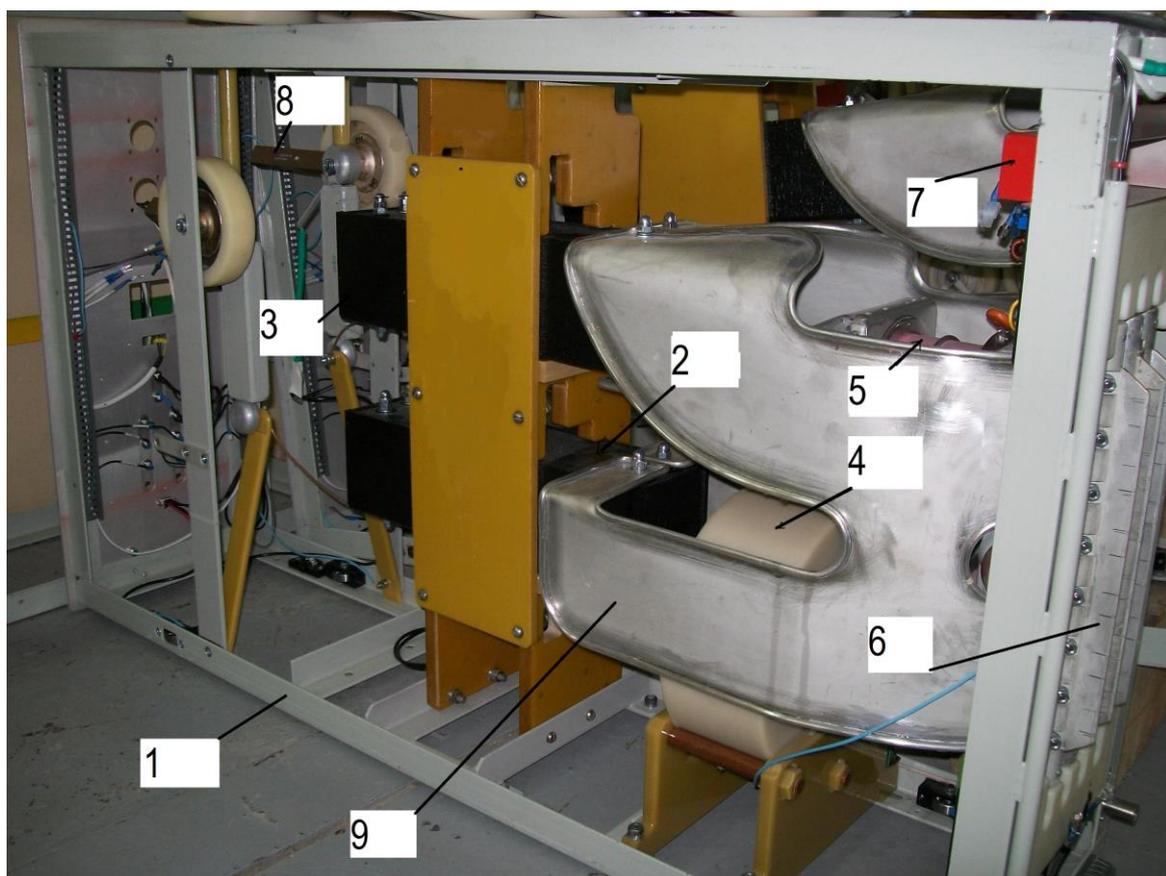


Рис. 61. Модулятор на базе масляных формирующих линий

1- Каркас, 2- Первая формирующая линия, 3- Вторая формирующая линия, 4- Магнитный вентиль, 5- Тиратрон, 6- Блок разъемов, 7- Блок управления тиратроном, 8- Зарядный диод, 9- Шина

Модуляторы устанавливаются в специальную стойку (Рис. 62), рассчитанную на шесть модуляторов в три этажа. Всего используется 8 стоек. Каждая модуляторная стойка укомплектована одним крейтом «Сомраст РСІ» с необходимой для работы системы электроникой.

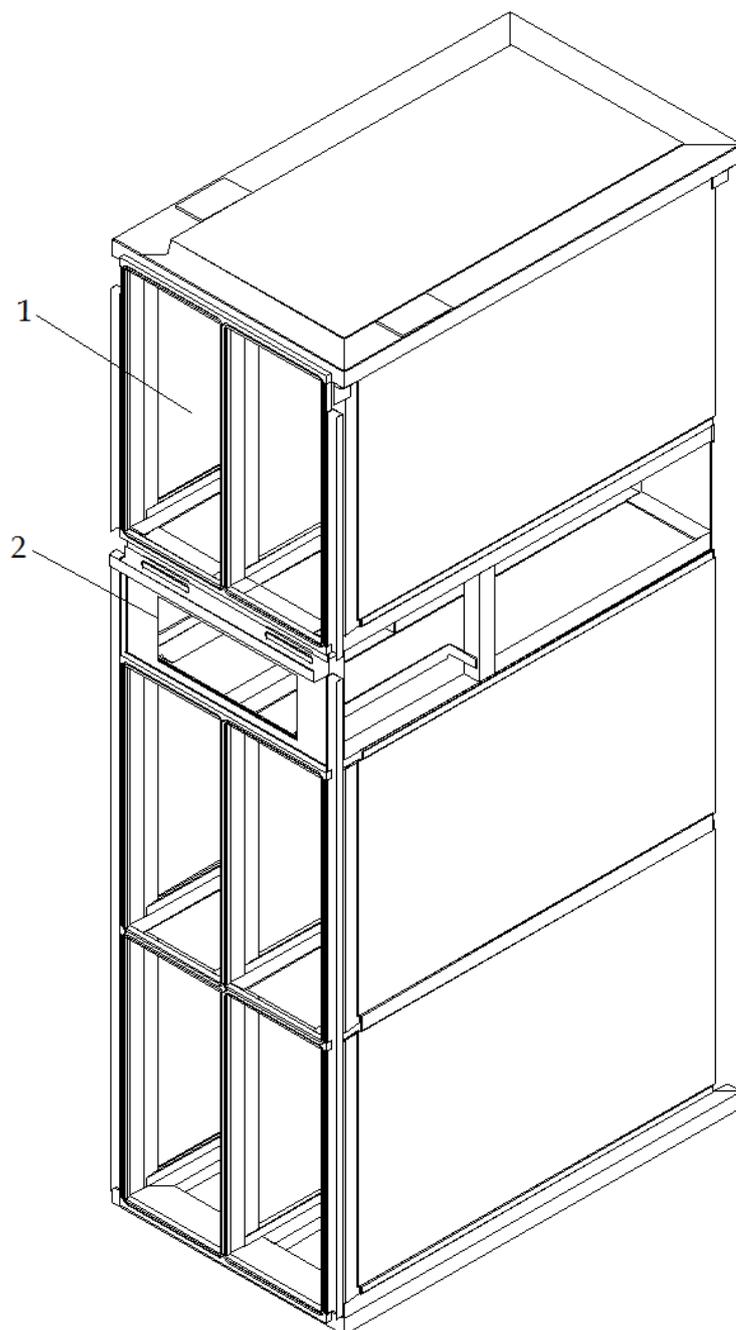


Рис. 62. Конструкция стойки модуляторов

1- Место для установки модулятора, 2- Место для установки крейта

9.2. Зарядное устройство

В зарядном устройстве (Рис. 63) используется масляный трансформатор, поэтому по технике пожарной безопасности нужно было предусмотреть масло приёмную емкость. В масло приёмный бак устанавливается рама, на которой размещены все элементы зарядного устройства.

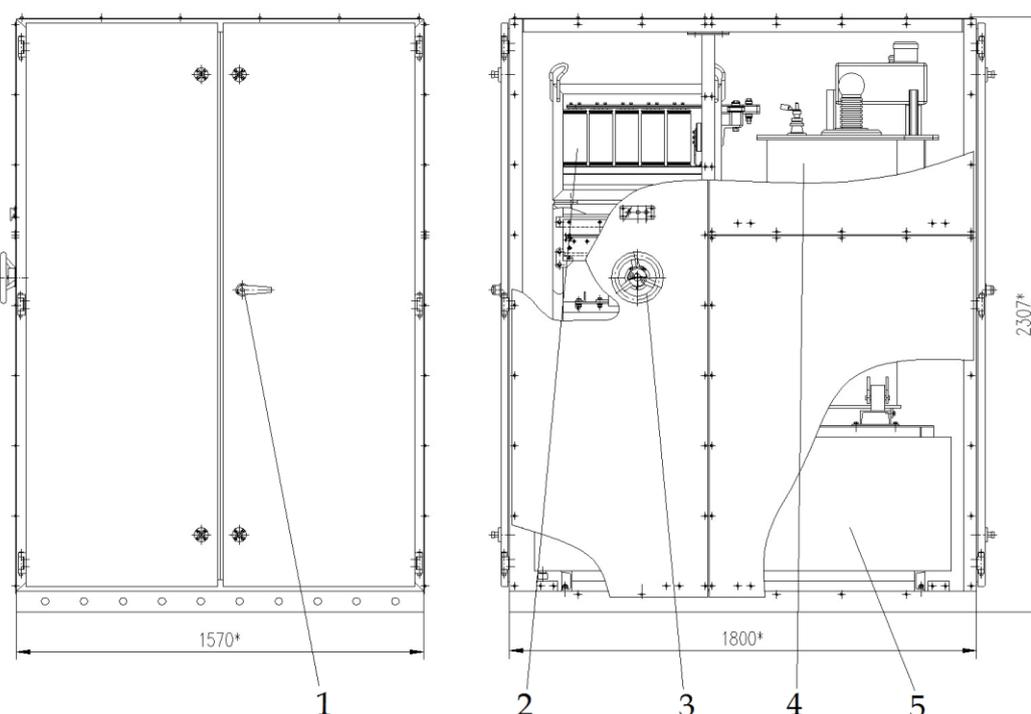


Рис. 63. Зарядное устройство

1- Двери с замком, 2- Накопитель емкостной, 3-Землитель 50 кВ, 4- Масляный трансформатор ТМ-100/35, 5- Масло приёмный бак

Каждое зарядное устройство соединяется с нужной группой модуляторов через один высоковольтный кабель и систему разветвления зарядного тока, расположенную на стойках модуляторов. Каждое зарядное устройство управляется независимо по каналу последовательной связи CAN, принимает входной импульс запуска и отдает осциллограммы тока и напряжения в зарядной цепи.

Заключение

В данной работе представлена конструкция основных систем и элементов разработанная для использования в линейном индукционном ускорителе ЛИУ-2.

Основные результаты диссертационной работы состоят 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.

В заключение выражаю глубокую благодарность научному руководителю работы С.В. Шиянкову, П.В.Логачеву и Л.Л. Константиновой за руководство и помощь в процессе написания работы.

Выражаю искреннюю благодарность А.М. Батракову, Г.И.Кузнецову, А.А. Корепанову, А.В. Акимову, А.Н. Косареву, А.П. Торшину, В.Е. Акимову, И.Е. Кореневу, С.И. Рувинскому, М.А. Холопову за совместные обсуждения и помощь при создании всего комплекса оборудования описанного в работе.

Выражаю благодарность всем сотрудникам НКО и другим сотрудникам ИЯФ, принимавшим участие в обсуждении, проектировании и изготовлении описанных элементов и систем.

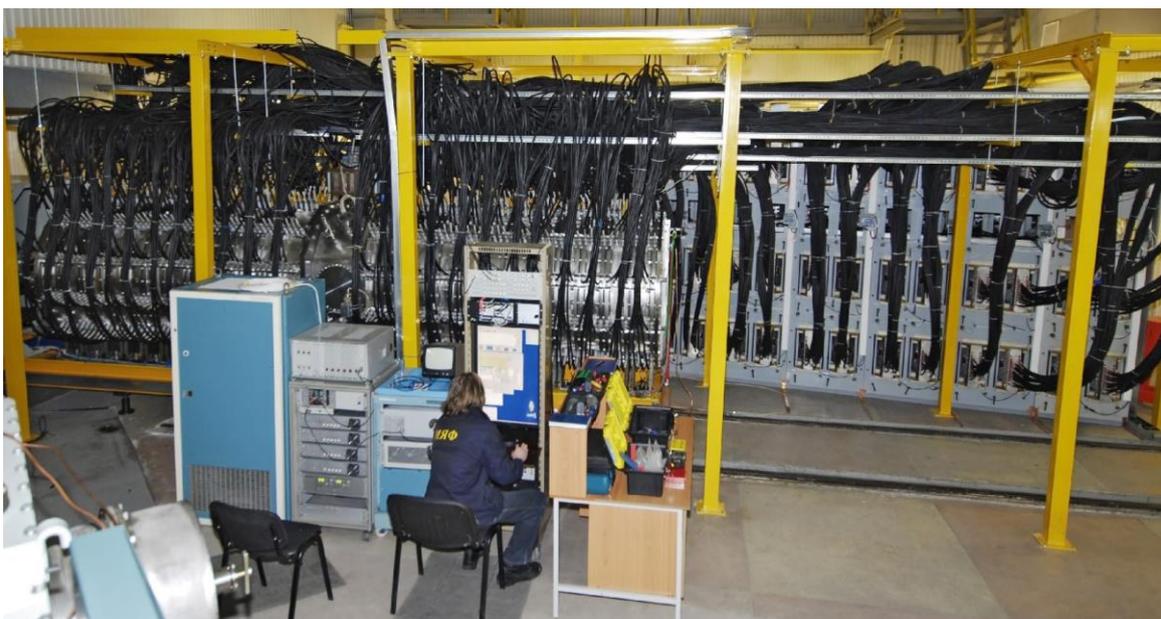
Литература

1. Ken Takayama, Briggs, Richard J. (Eds.) // Induction Accelerators. Springer. 2011
2. L.G. Multhauf // The LLNL Flash X-Ray Induction Linear Accelerator (FXR), Preprint UCRL-JC-148534 LLNL, 2002.
3. C. Wilkinson // Dual Axis Radiographic Hydrodynamic Testing: The DARHT Project. LANL, 2003.
4. M. I. Burns, B. T. Carlsten, H. A. Davis, et al. // Status of the DARHT Phase 2 long pulse accelerator– в кн. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001, с. 325-329.
5. M. Mouillet, R. Boivinet, F. Bombardier, J. Delvaux, et al. // First results of the AIRIX induction accelerator – в кн.: Proceedings of the XX International Linac conference , Monterey, California p. 491-493.
6. E. Merle, R. Boivinet, M. Mouillet et al. // Installation of the AIRIX Induction Accelerator. в кн.: Proceedings of the 19th International Linear Accelerator Conference , Chicago, 1998, p. 391-393.
7. A. Georges // Airix Accelerator Recommissioning. XXVII International Linear Accelerator Conference, Geneva, 2014.
8. <http://www-lmj.cea.fr/en/simulation-program/airix.htm>
9. Zhang Kaizhi, Wen long, Li Hong // Dragon-I injector based on the induction voltage adder technique, Physical Review Special Topics – Accelerators and Beams 9, 080401, The American Physical Society, 2006.
10. В.И. Феодосьев // Сопротивление материалов. – Москва, издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999, с. 242-248.
11. Ю.П. Вахрушин, А. И. Анацкий // Линейные индукционные ускорители. – Москва, Атомиздат, 1978.

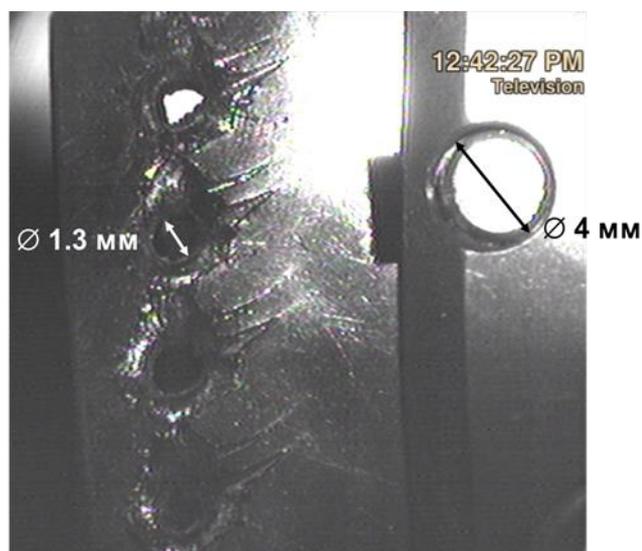
12. Ю. Н. Стародубцев, В. Я. Белозеров // Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов. – Екатеринбург, издательство Уральского университета, 2002.
13. Д.А. Старостенко, П.В. Логачев, А.В. Акимов, А.А. Корепанов, П.А. Бак, А.Н. Панов, О.А. Павлов и др. // Результаты работы ЛИУ-2 в рентгенографическом режиме. Письма в ЭЧАЯ, 2014, Т.11, №5(189), с. 1022-1028.
14. А.Р. Ахметов, П.С. Базаров, А.В. Акимов, П.А. Бак, О.А. Павлов и др. // Измерение параметров электронного пучка в инжекторе ЛИУ (ЛИУ-2). Атомный проект, 2012, №13, с. 23-26.

Приложения

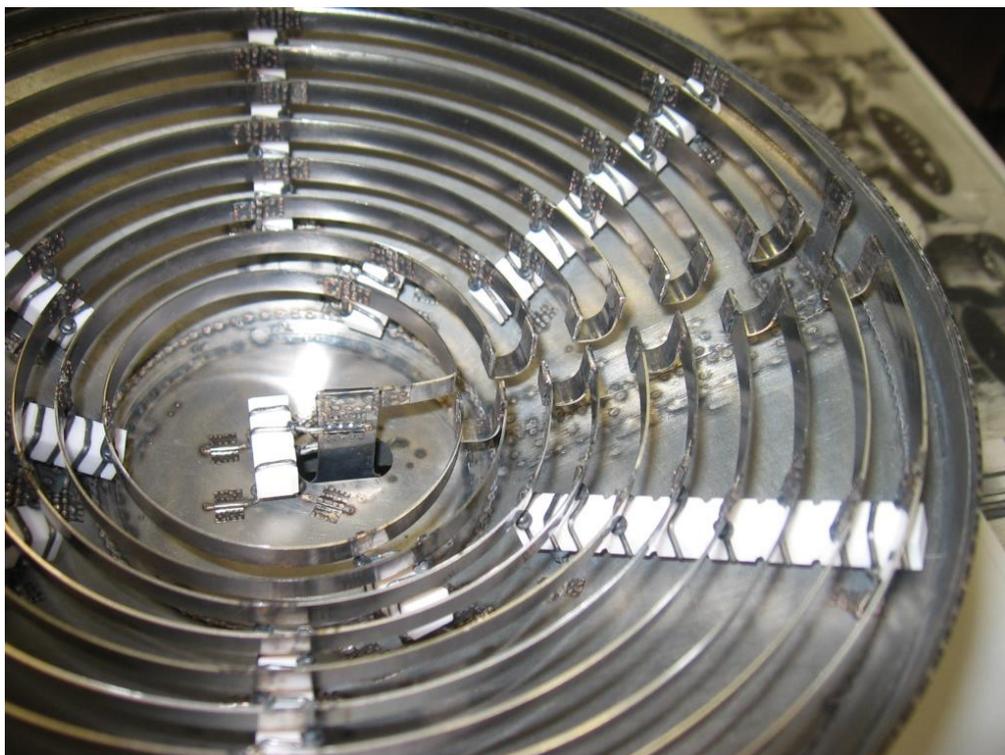
На текущий момент ускоритель введен в эксплуатацию и по результатам экспериментов позволяет при энергии 1.7 МэВ и токе 1,4 кА просвечивать объекты до 70 мм в свинцовом эквиваленте [13].



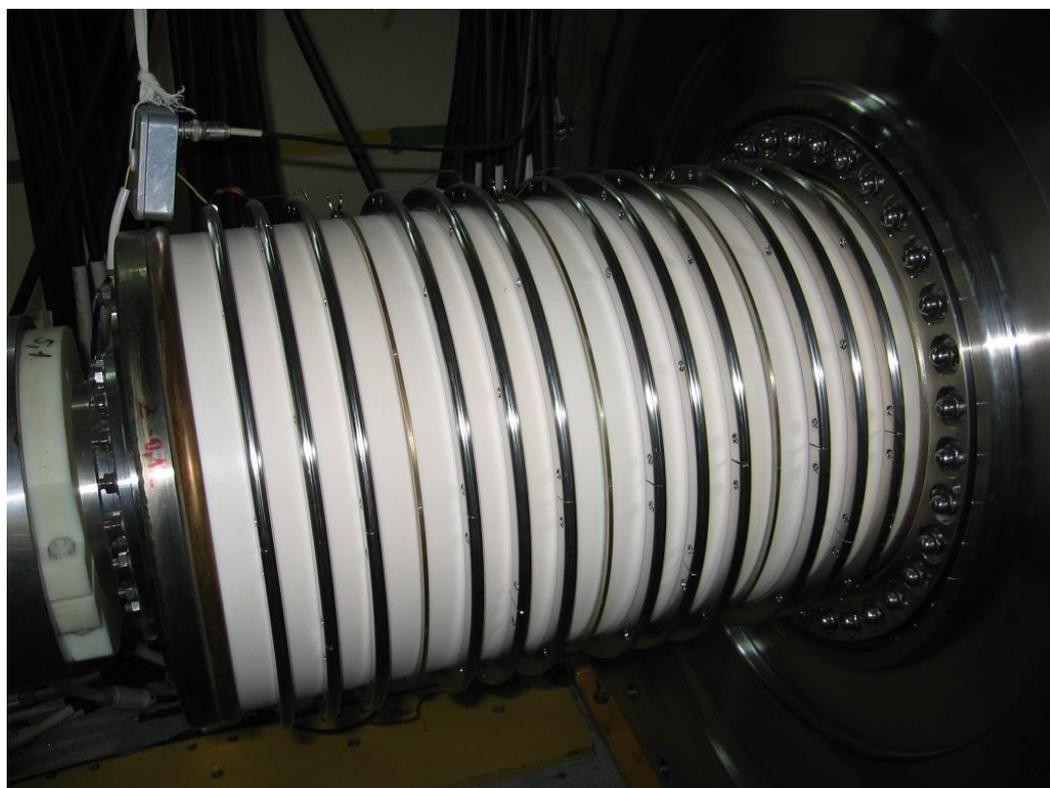
Приложение 1. Ускоритель ЛИУ-2



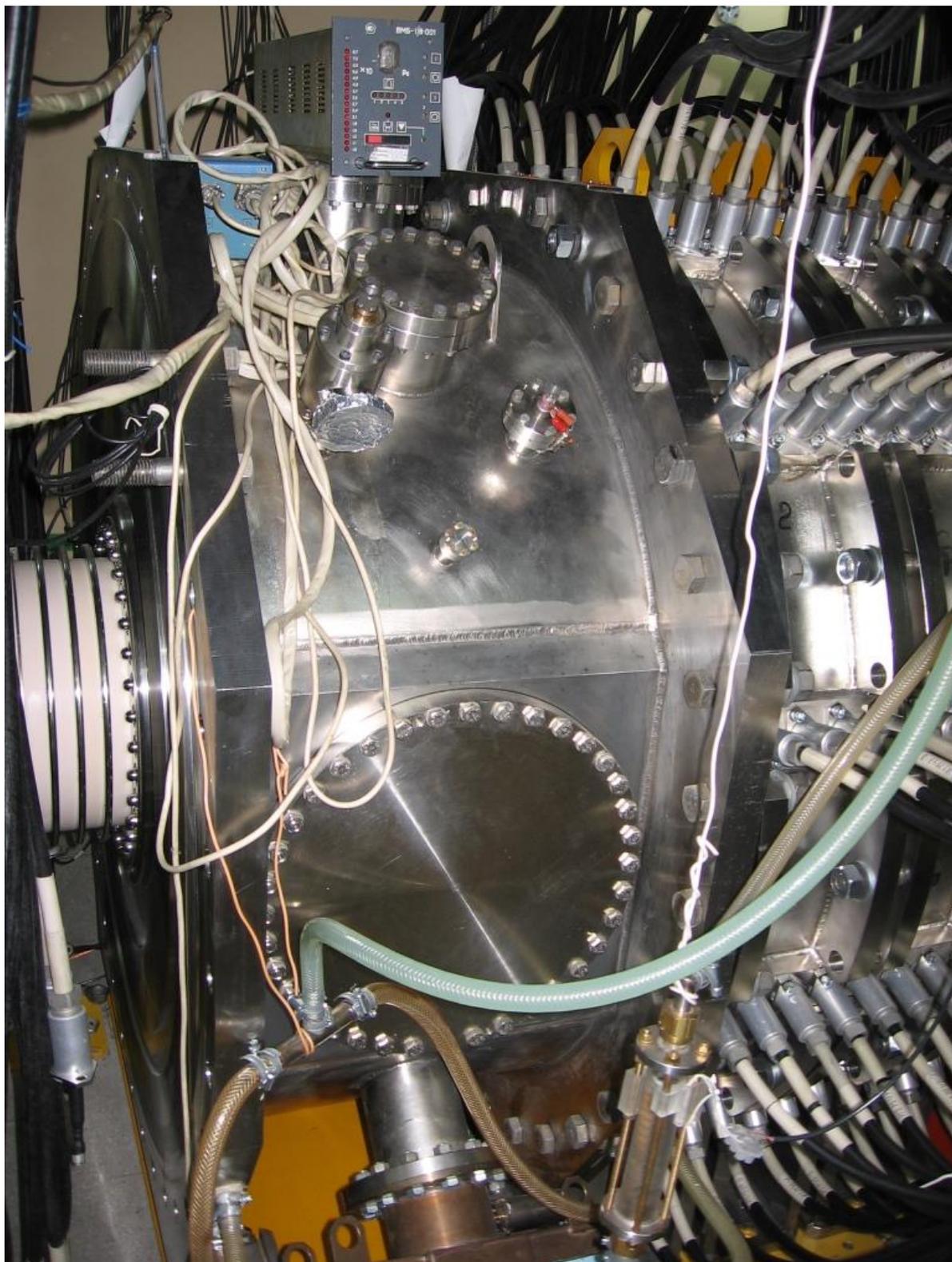
Приложение 2. Танталовая мишень со следами от пучка



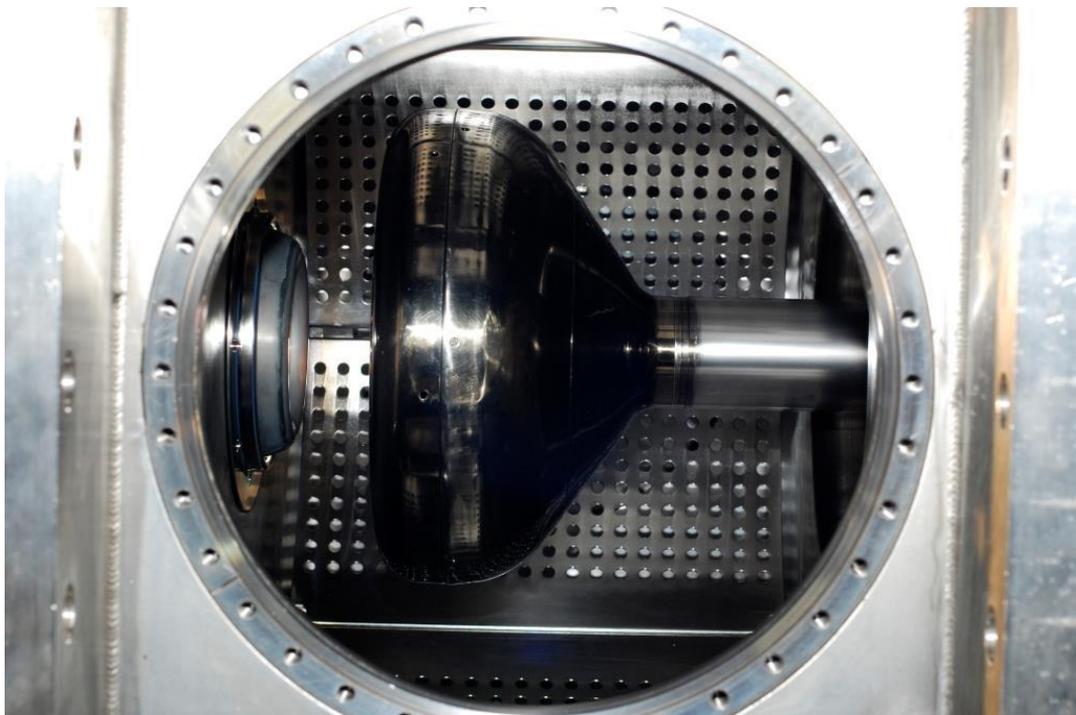
Приложение 3. Нагревательный элемент катода.



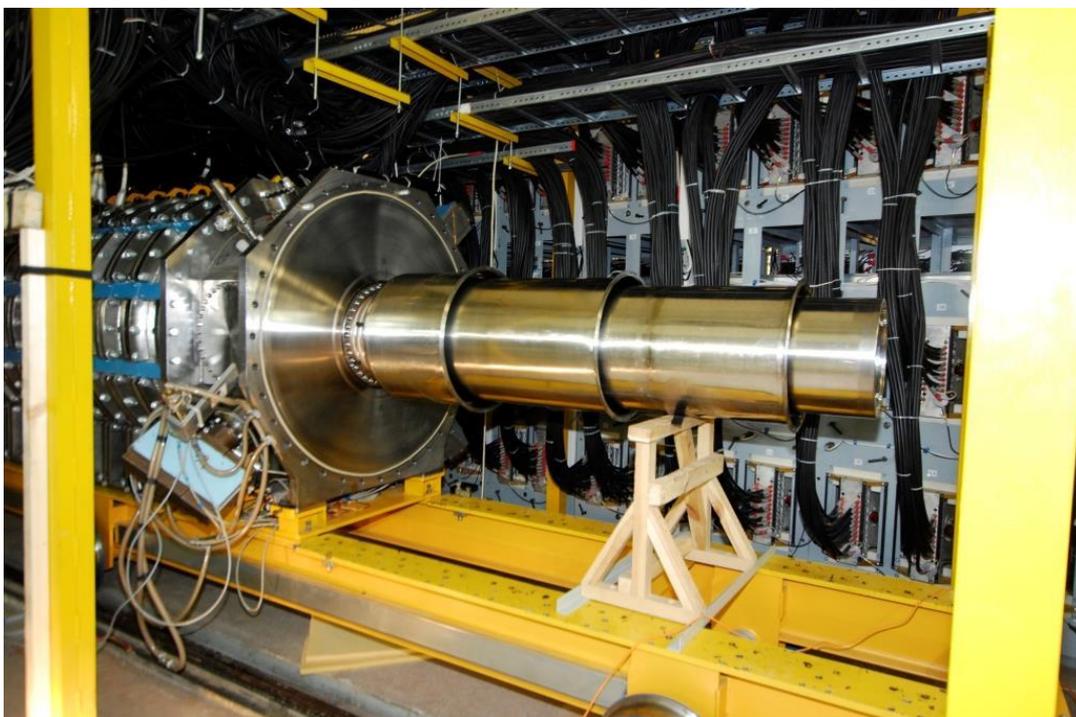
Приложение 4. Ускорительная трубка.



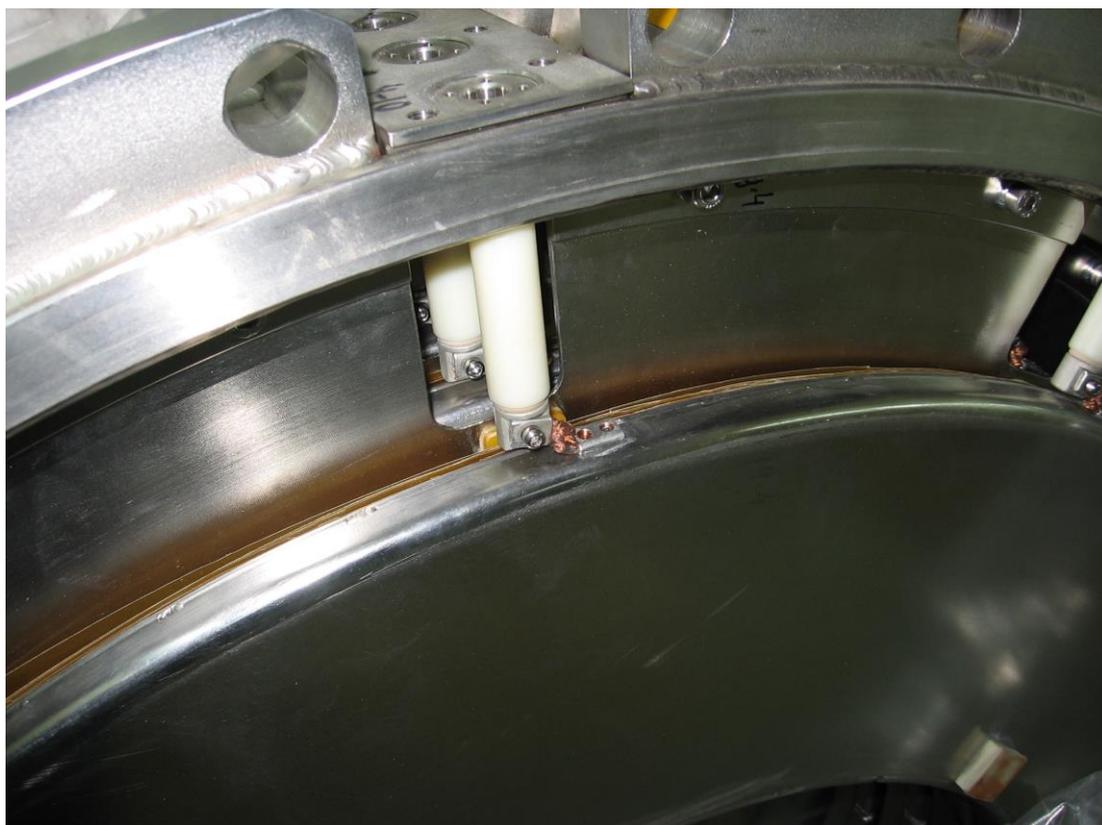
Приложение 5. Центральный корпус.



Приложение 6. Анод и катод в центральном корпусе.



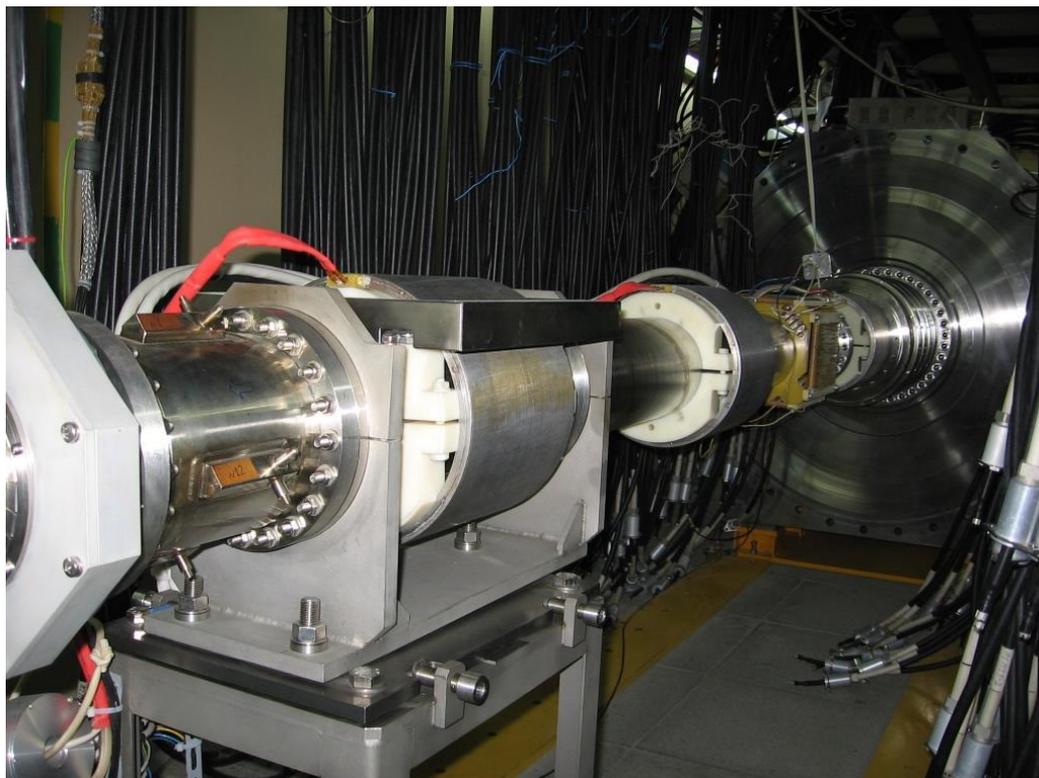
Приложение 7. Электроды, соединяющие ускорительную трубку с индукторами.



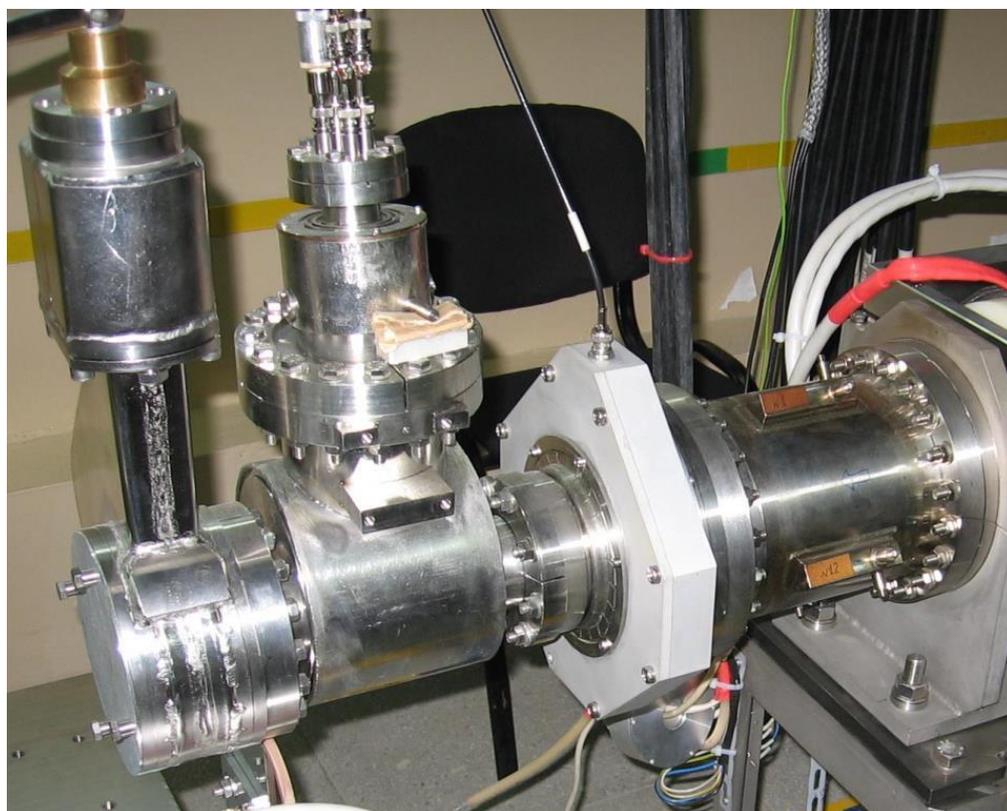
Приложение 8. Ввод корпуса индукторов.



Приложение 9. Центральный корпус в сборе с корпусами индукторов.



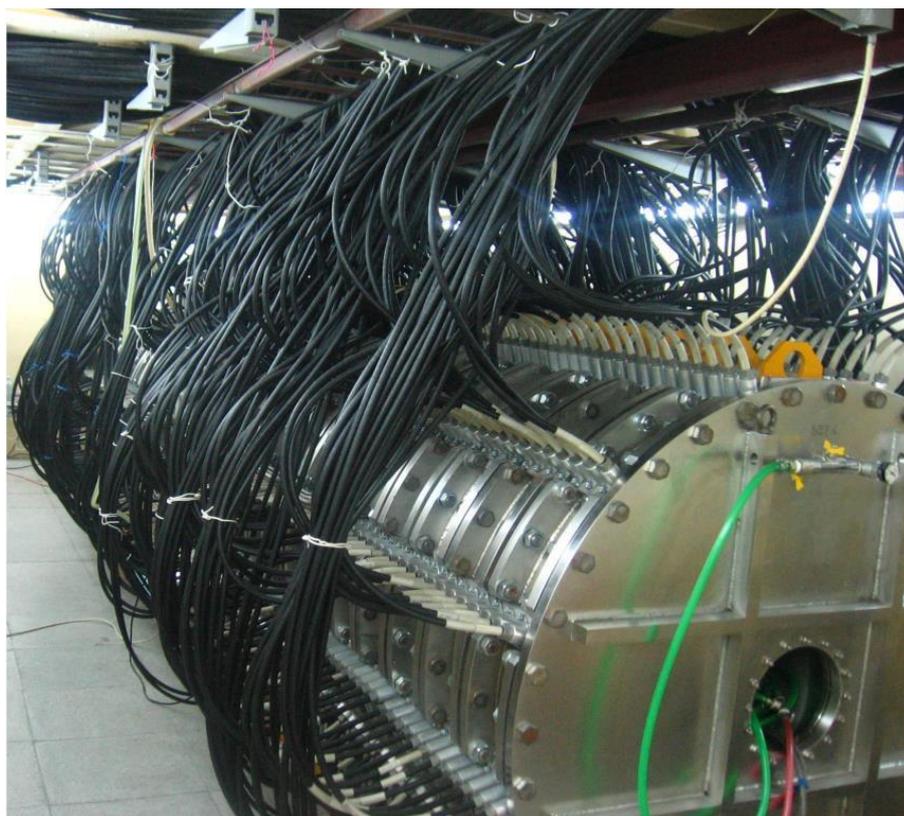
Приложение 10. Система фокусировки пучка..



Приложение 11. Система измерений параметров пучка.



Приложение 12. Мишенный узел.



Приложение 13. Кабельная линия – подключение к индукторам.



Приложение 14. Кабельная линия – разводка кабелей от зарядного устройства к модуляторам.



Приложение 15. Кабельная линия – подключение к модуляторам.



Приложение 16. Зарядное устройство.