

Отзыв официального оппонента  
на диссертацию **Павлова Олега Анатольевича**  
"Конструкция основных систем и элементов линейного индукционного  
ускорителя электронов ЛИУ-2",  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности  
01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Цель представленной работы состояла в осуществлении научно-технических разработок, направленных на создание надежной и высокотехнологичной конструкции основных узлов линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-2, включая основную часть ускорителя - электронно-оптическую систему формирования пучка.

Актуальность темы диссертации определяется необходимостью создания мощных импульсных источников рентгеновского излучения для наблюдения баллистических и быстропротекающих процессов в больших толщинах тяжелых металлов, что позволяет исследовать высокоскоростные процессы, такие как детонации и горения. Такие исследования необходимы, в частности, при разработке ядерного оружия без проведения натуральных ядерных испытаний. Для целей рентгеновской томографии в мире построено несколько больших (с энергией более 10 МэВ) сильноточных индукционных ускорителей: в США - FXR, DARHT-I и DARHT-II, во Франции - AIRIX и в КНР - DRAGON. В России для этих исследований достаточно давно применялся бетатрон БИМ, который не обеспечивает ускорение сильноточных пучков.

Практическая значимость выполненной автором работы подтверждается нижеследующим.

Результаты работ, описанных в диссертации, сыграли важную роль в создании первого в России линейного индукционного ускорителя, способного работать в составе комплекса для импульсной рентгенографии. Предложенные конструктивные решения обеспечили:

- точность сборки конструкций и проводки пучка;
- формирование требуемого ускоряющего напряжения;
- прецизионную диагностику и фокусировку пучка.

Это позволило получить требуемые параметры ускорителя.

Научная новизна положений, представленных в диссертационной работе, состоит в следующем:

Впервые в отечественной практике была разработана конструкция электронно-оптической системы и устройств формирования ускоряющего напряжения, позволившая получить пучок электронов при энергии 1.7 МэВ со следующими рекордными параметрами:

- компрессия – 5;
- магнитная компрессия – 1600;
- плотность электронов в фокусе -10 А/см при размере менее 2 мм.

Достаточно высокая степень обоснованности научных положений выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается надежной работой линейного индукционного ускорителя электронов ЛИУ-2.

Содержание диссертации, состоящей из введения, девяти глав и заключения, соответствует теме диссертации и дает достаточно полное представление об объеме и качестве проделанной автором работы и полученных результатах.

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, разработаны: конструкция индукторов ускорителя, конструкция элементов системы диагностики и фокусировки пучка, конструкция зарядного устройства, конструкция модулятора на базе пленочных диэлектриков, а также общая схема сборки ускорителя.

Во **Введении** автор показал актуальность создания сильноточного линейного индукционного ускорителя с энергией до нескольких МэВ, проведя анализа зарубежных установок, позволяющих проводить рентгенографические исследования стратегического вооружения. Были сформулированы основные цели работы и выносимые на защиту положения.

**Глава 1** посвящена описанию разработанной установки. ЛИУ-2 является прототипом инжектора большого линейного индукционного ускорителя с конечной энергией электронного пучка 20 МэВ, предназначенного для малоракурсной рентгеновской томографии. Поскольку ЛИУ-2 сам по себе создает прецизионный электронный пучок большой интенсивности, то он может работать в качестве самостоятельной рентгенографической установки указанного типа. Для исследования быстропротекающих процессов ускоритель может формировать два одинаковых импульса тока с интервалом в несколько микросекунд.

Во **второй главе** работы приведен прочностной расчет конструкции электронно-оптической системы формирования электронного пучка, описаны особенности технологии и основные этапы изготовления: анода, катодного узла и ускорительных трубок. Разработанный на основе расчетов автора катодно-анодный узел имеет возможные смещения в пределах 0.1 мм.

Требуемые параметры ускоренного пучка достигаются только при высокой точности изготовления ускорительных трубок. Специальное приспособление для прецизионной сварки элементов трубок, разработанное автором, обеспечило соосность фланцев трубок в пределах 0.15 мм.

В **третьей главе** освещены вопросы, относящиеся к центральному корпусу ЛИУ-2. Для успешной работы ускорителя точность установки каждого элемента электронно-оптической системы должна быть не менее 0.1 мм при условии, что внутри корпуса вакуум, а снаружи боковых стенок находится элегаз под избыточным давлением 0.7 атм. Для достижения заявленных параметров пучка необходимо, чтобы прогиб стенок корпуса был не более

0.5 мм. Для этого автором был выполнен расчет стенок, определивший необходимую толщину стенок - 50 мм.

Ускорительные трубки и первая линза монтируются без возможности регулировки, поэтому их положение определяется только точностью изготовления посадочных мест. Это достигается, согласно оценкам автора, при точности обработки поверхностей в пределах 0.05 мм.

**В четвертой главе** рассмотрена конструкция вакуумной камеры. Требования к вакуумной системе, в основном, определяются типом катода. Для используемого в ускорителе дисперсионного катода вакуум должен быть не хуже  $5 \cdot 10^{-8}$  Торр. Все элементы вакуумной камеры ускорителя должны перед сборкой проходить обезгаживающий отжиг в вакуумной печи. Сборка высоковакуумной системы должна проходить в защищенном от пыли помещении. Прочностной расчет показал, что прогиб камеры под нагрузкой от корректора и двух линз составляет 0.15 мм, что находится в пределах допустимого.

**Пятая глава** посвящена проектированию системы фокусировки пучка. Совмещение оси системы фокусировки с осью пучка электронов обеспечивается точностью обработки посадочных мест элементов системы. Опоры линзы изготовлены с точностью, обеспечивающей допустимое смещение магнитных элементов относительно оси вакуумной камеры менее 0.1 мм. Линзы спроектированы так, чтобы максимально уменьшить величину сферической аберрации. Корректор располагается после первой линзы и компенсирует слабые внешние магнитные поля. Все линзы и корректор имеют индивидуальное питание с долговременной стабильностью лучше 0.1%.

**В шестой главе** диссертации рассмотрена созданная с участием автора конструкция ускорительной секции ЛИУ, для которой впервые в России разработаны индукторы с использованием аморфного ферромагнитного материала.

Ускорительная система собирается из секций по 4 индуктора. Подключение к индуктору питающих высоковольтных кабелей производится через герметичные разъемы, поскольку внутренний объем корпуса для обеспечения электрической прочности заполнен элегазом под давлением 0.7 ати.

**Седьмая глава** посвящена описанию элементов диагностики пучка, разработанных при определяющем участии автора диссертации. Описываются датчик положения пучка, трансформаторы тока и координатный узел. 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. Полное напряжение на вакуумном диоде измеряется с помощью специально спроектированного емкостного делителя напряжения.

**Восьмая глава** является логическим продолжением предыдущей и посвящена разработке мишенного узла. Он предназначен для прецизионной

фокусировки электронного пучка на мишень – конвертор. Мишенный узел имеет независимую систему откачки, что необходимо для регулярной замены мишенных пластин без нарушения высокого вакуума в ускорителе. Узел также способен поглотить интенсивный электронный пучок при отсутствии мишени.

**В девятой главе** описана конструкция элементов системы питания импульсных блоков – модуляторов, предназначенных для формирования на ускорительных секциях последовательности из двух импульсов напряжения прямоугольной формы. Каждый модулятор способен работать независимо и формировать на индукторе импульсы требуемой формы. В модуляторах применяются два типа формирующих линий. Конкретно автором была разработана конструкция модулятора с использованием пленочных диэлектриков.

**В заключении** в тезисной форме в трех кратких абзацах приведены основные практические результаты диссертационной работы, заключающиеся во внедрении выполненных автором диссертации научных разработок в действующую и эффективно развиваемую электрофизическую установку.

**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, позволившие создать работоспособные конструкции катодной части электронно-оптической системы.

Недостатки диссертации состоят в следующем.

Изложение представленной автором большой проделанной работы носит местами тезисный характер.

Не всегда проводится сравнительный анализ представленных оригинальных разработок с техническими решениями других авторов.

В диссертации редко приводятся ссылки на собственные авторские публикации, непосредственно относящиеся к излагаемому материалу.

В тексте иногда используются профессионально-жаргонные выражения.

Отмеченные критические замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы, в которой решена задача по созданию линейного индукционного ускорителя с параметрами на уровне мировых и не имеющего аналогов в России, что имеет важное значение для развития ускорительной техники и соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» в части, касающейся кандидатских диссертаций.

В диссертации подробно отражается существенный вклад автора в создание уникального ускорителя ЛИУ-2, который является прототипом инжектора ЛИУ на энергию 20 МэВ, и, одновременно, самостоятельной ускорительной установкой для рентгеновской томографии.

Результаты диссертационной работы были представлены на семинарах и конференциях, а также опубликованы в реферируемых журналах и трудах конференций и могут быть использованы в научных центрах НИИЭФА, ИТЭФ, ФИАН, ОИЯИ, НИЯУ МИФИ и др.

Диссертационная работа О.А.Павлова представляет собой законченную исследовательскую работу и удовлетворяет всем требованиям положения о присуждении ученой степени, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а Павлов Олег Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника за решение технических задач, имеющих большое значение для развития технологии создания линейных индукционных ускорителей электронов.

Автореферат диссертации правильно отражает ее содержание.

Старший научный сотрудник ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»

кандидат физико-математических наук



А. А. Дроздовский

адрес: 117218, Россия, Москва, ул. Б. Черемушкинская 25,

Тел. 499-127-47-44, факс: 499-127-08-21,

e-mail: [drozdovsky@itep.ru](mailto:drozdovsky@itep.ru)

08 декабря 2015 года

Подпись А. А. Дроздовского заверяю;

Ученый секретарь ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ»

кандидат физико-математических наук



В.В.Васильев