

9-90-252

П-305

ПЕТРОВ
Виктор Александрович

УДК .621.384.6

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ
СИСТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ
ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ СИЛЬНОТОЧНОГО
ИНДУКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ
НАНОСЕКУНДНОГО ДИАПАЗОНА СИЛУНД-20**

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Общественном научно-методическом отделении Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Долбилов
Геннадий Варламович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Фурман
Эдвин Гугович

кандидат технических наук

Овсянников
Владимир Петрович

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Московский инженерно-физический институт, Москва.

Защита диссертации состоится "21 июня 1990 г. в _____ час.
на заседании Специализированного совета Д.047.01.02. при Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований, Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "16 мая 1990 года.

Ученый секретарь Специализированного совета *М.Ф. Лихачев*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Пучки электронов относительно низкой энергии ($0,5 \pm 30$ МэВ) но высокой интенсивности ($10^2 \pm 10^4$ А) имеют чрезвычайно большие возможности применения в науке, технике, медицине и народном хозяйстве. Они используются для генерации СВЧ-излучения, накачки лазеров, для получения интенсивного рентгеновского излучения, в коллективных методах ускорения, в радиационной химии и радиобиологии. Особый интерес представляет поиск решения проблем управляемого термоядерного синтеза с помощью электронных пучков. Такие пучки получают в ускорителях различных типов. Во многих случаях например, в экспериментах по коллективному ускорению, для получения мощных вспышек рентгеновского излучения и СВЧ-колебаний, наиболее подходящим инструментом оказался линейный индукционный ускоритель (ЛИУ). Поэтому многие лаборатории, как внутри страны, так и за рубежом, занимаются разработкой и созданием все более совершенных ЛИУ. Сильноточный индукционный линейный ускоритель электронов СИЛУНД-20, использованный в качестве инжектора коллективного ускорителя, отличается высокой циклическостью (до 50 Гц) и стабильностью параметров. ЛИУ СИЛУНД-20 позволяет формировать пучки электронов с током до 1 кА и энергией до 2 МэВ.

Цель работы.

1. Разработка, создание и запуск основных систем сильноточного индукционного линейного ускорителя наносекундного диапазона СИЛУНД-20.
2. Экспериментальное исследование основных систем ускорителя и характеристик пучка электронов.

Научную новизну работы составляют новые технические решения по способам формирования, транспортировки и ускорения сильноточных электронных пучков в ЛИУ, а также новые результаты исследований пучка и систем ускорителя. Предложены и реализованы плазменный источник электронов, система индукционного ускорения и система транспортировки пучка ЛИУ. Показано существование порогового давления в области катода плазменного источника и диапазона геометрических и электротехнических параметров, определяющих стабильность тока и ресурс работы источника. Определены требования к системам ускорителя, обеспечивающие малые потери и необходимую стабильность пучка.

Практическая ценность. Полученные результаты позволили реализовать создание сильноточного индукционного линейного ускорителя наносекундного диапазона СИЛУНД-20 - инжектора коллективного ускорителя тяжелых ионов.

Результаты диссертации могут быть использованы при разработке линейных индукционных ускорителей для различных областей науки, техники и народного хозяйства.

Апробация работы. Материалы диссертации представлялись и докладывались на Совещании по проблемам коллективных методов ускорения в г.Дубне (1982 г.), IX Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц в г.Дубне (1984 г.), Международной конференции "ЛИНАК-86" в г.Стенфорде, США (1986 г.) и Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий в г.Новосибирске (1986 г.).

Публикации. Основные результаты, вошедшие в диссертацию, отражены в 10 печатных работах, опубликованных в журнале "Приборы и техника эксперимента", трудах Совещания

по проблемам коллективных методов ускорения, в виде препринтов и сообщений ОИЯИ, а также изобретения.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 96 страницах машинописного текста, иллюстрируется 51 рисунком. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы из 88 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, кратко изложены принципы построения ЛИУ, основные методы формирования, транспортировки и ускорения электронного пучка в ЛИУ. Сформулирована цель работы, дана характеристика исследуемой проблемы. Кратко отражены содержание, структура диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой, созданием и исследованием системы формирования пучка электронов ускорителя СИЛУНД-20^{1,2,3/}: конструкция, принцип действия и измерение характеристик системы формирования^{4,5/}. Отличие данной системы от других, также использующих плазменный источник электронов, заключается в высокой частоте следования импульсов (50 Гц), в стабильности тока пучка от импульса к импульсу (нестабильность не превышает 1%) и в большом ресурсе работы холодного катода, превосходящем 700 часов (при частоте 50 Гц).

В первом параграфе приводится описание плазменного источника электронов ускорителя СИЛУНД-20. Внешний вид и схема источника показаны на рис.1 и рис.2.



Рис.1. Общий вид системы формирования пучка.

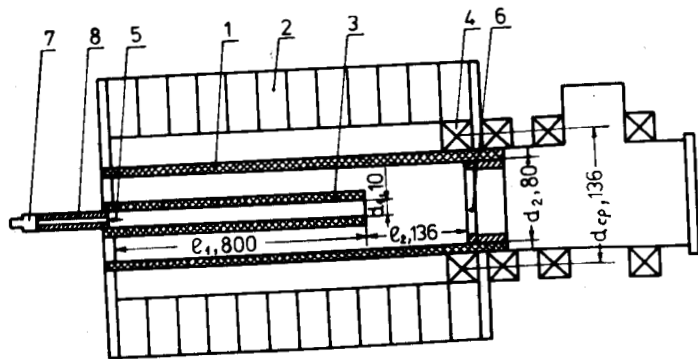


Рис.2. Схема плазменного источника электронов.

Игольчатый катод 5 изготовлен из вольфрама и установлен на входе разрядной трубки 3. Анод 6 представляет собой полый металлический цилиндр и установлен на выходе разрядной камеры 1. Натекание газа осуществляется через катодный шток 8 непосредственно в область эмиссии катода и регулируется с помощью натекателя 7. Откачка происходит со стороны анода. Магнитное поле формируется с помощью анодной линзы 4.

Рассматривается модель механизма образования плотной плазмы в протяженном разрядном канале с градиентом давления от анода к катоду и формирования пучка ускоренных электронов, позволившая выбрать геометрию источника и диапазон рабочих параметров. Указывается на существование граничного давления остаточного газа в области катода, начиная с которого влияние холодного катода на процесс эмиссии становится пренебрежимо мало. При этом значительно возрастают стабильность тока пучка и ресурс работы катода.

Показана роль продольного магнитного поля в процессе формирования плазменных электродов. Магнитное поле способствует образованию в разрядном канале области с пониженной концентрацией плазмы, к которой оказывается приложенным ускоряющее напряжение. Получена оценка фактора замагниченности плазменного катода.

Во втором параграфе рассматриваются схема и результаты исследования высоковольтного магнитного генератора наносекундных импульсов^{6/}, предназначенного для предварительной ионизации газа в плазменном источнике электронов. Предложенная схема (рис.3)

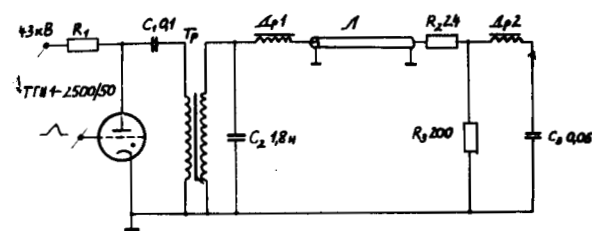


Рис.3. Схема магнитного генератора.

формирует мощные высоковольтные импульсы с коротким фронтом. Коммутатором является тиратрон. Мощность предварительно трансформированного импульса повышается с помощью магнитного звена, затем осуществляется обострение его фронта и формирование спада. Отличие данного генератора от других, также использующих нелинейные схемы, заключается в том, что он работает при существенно более высоких напряжениях.

Проведен анализ работы схемы, приводятся описание конструкции и результаты измерения характеристик магнитного генератора.

При помощи магнитного звена получается выигрыш по напряжению в 2,5 раза. В коаксиальной линии с ферритом происходит уменьшение фронта до 3 нс при напряжении 250 кВ. На выходе генератора формируются высоковольтные импульсы с длительностью фронта ~6 нс и амплитудой ~170 кВ.

В третьем параграфе приводятся результаты исследования характеристик плазменного источника электронов. Диапазон рабочих режимов источника: ток до 1,2 кА, энергия электронов до 400 кэВ, длительность импульса тока ~40 нс, частота следования импульсов до 50 Гц.

На рис.4 показаны вольт-амперные характеристики источника. Из рисунка видно, что

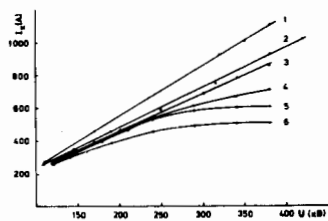


Рис.4. Вольт-амперные характеристики источника электронов при давлении $P_A = 2 \cdot 10^{-3}$ Тор (1), 10^{-3} Тор (2), $8 \cdot 10^{-4}$ Тор (3), $6 \cdot 10^{-4}$ Тор (4), $5 \cdot 10^{-4}$ Тор (5), $4 \cdot 10^{-4}$ Тор (6).

при частоте следования импульсов 50 Гц. Нестабильность тока источника не превышает 1% и не возрастает в процессе работы.

Во второй главе рассматриваются вопросы разработки, исследования и технической реализации системы транспортировки пучка ускорителя СИЛУНД-20^{4,7/}.

В первом параграфе главы сформулированы требования к системе транспортировки, дается описание ее конструктивных особенностей. Система транспортировки (рис.5) состоит из четырех ускорительных трубок 6, пяти откачных камер 7 на стыках индукционных секций и фокусирующих катушек 9. Дифрагмированная ускорительная трубка имеет внутренний диаметр оперттуры 70 мм. Используются межсекционные камеры двух типов. В одном случае материалом является керамика, в другом - листовая титан толщиной $\sim 0,5$ мм.

Проведены расчеты требуемой величины фокусирующего магнитного поля и параметров фокусирующей системы. Дано обоснование выбора длительности токового импульса, питающего фокусирующие катушки (50 мкс), и описание их конструкции. Азимутальная однородность фокусирующего магнитного поля повышается путем использования специальной геометрии выводов катушек. Продольная однородность фокусирующего поля в межсекционной области достигается при помощи симметрично разрезанных медных полых цилиндров с толщиной стенки большей, чем величина скин-слоя, расположенных на внутренних стенках откачных камер и ускорительных трубок. Приведено объяснение принципа действия выравнивающих цилиндров.

Обосновано необходимость симметризации всех металлических элементов ускорительного трокта. Результатом является повышение азимутальной однородности фокусирующего магнитного поля.

Отсутствие потерь пучка и надежное охлаждение фокусирующих катушек, выравнивающих цилиндров, диафрагм и титановых межсекционных камер обеспечивает работоспособность системы транспортировки пучка с частотой 50 Гц. Фокусирующая система формирует соленоидальное магнитное поле с индукцией до 0,4 Т.

возможно дальнейшее увеличение тока пучка при повышении максимального напряжения модулятора. Существует широкая область значений магнитного поля анодной линзы, при которых коэффициент прохождения тока за анод близок к единице. Проведенные исследования позволили оптимизировать геометрию источника. Найден режим работы источника, в котором для предварительной ионизации газа в разрядном канале достаточно предимпульса модулятора.

Определена скорость распространения фронта ионизации в данных условиях ($\sim 10^8$ см/сек). Все измерения проводились

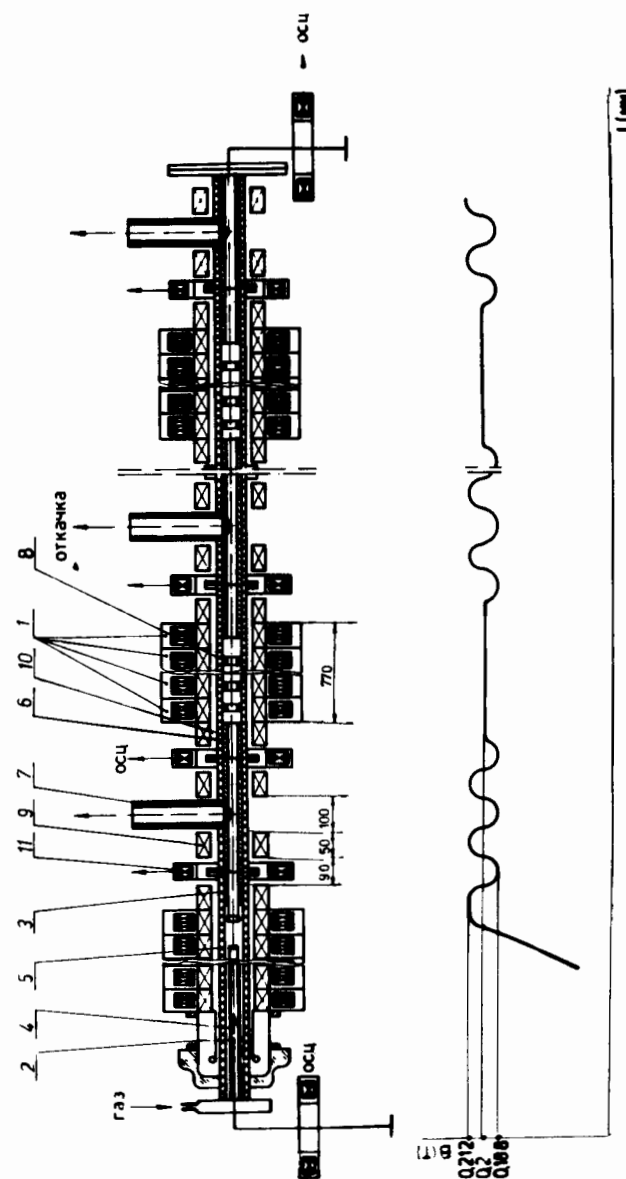


Рис.5. Схема ускорителя СИЛУНД-20.

Во втором параграфе произведена оценка влияния неоднородности фокусирующего магнитного поля на пучок и определены требования к однородности поля. Приведены результаты исследования влияния на импульсное магнитное поле длительностью 50 мкс специальных выравнивающих экранов, повышающих однородность фокусирующего поля.

Проведенные измерения позволили оптимизировать геометрию формирующей структуры. Распределение фокусирующего магнитного поля вдоль оси ускорительного тракта показано на рис.5. Неоднородность поля на стыках секции не превышает $\pm 6\%$, несмотря на наличие значительных технологических промежутков для вакуумных и диагностических устройств. Азимутальная неоднородность магнитного поля на радиусе 30 мм менее $\pm 1,5\%$.

Приводятся результаты экспериментального исследования тепловых режимов работы элементов и узлов системы транспортировки. Система способна надежно и долговременно функционировать с частотой 50 Гц при токах в фокусирующих катушках ~ 2 кА. Измерение коэффициента токопрохождения пучка по ускорительному тракту показало, что он превышает 95%.

Третья глава диссертации посвящена вопросам разработки, создания и исследования индукционной системы ускорителя СИЛУНД-20.

В первом параграфе приведены конструктивные особенности индукционной системы /4,8/.

Ускоритель содержит 120 индукторов, объединенных в 5 ускоряющих секций. Для запитки секций используется модулятор с усилением импульсной мощности. Модулятор формирует импульсы длительностью 30 нс с амплитудой напряжения 17 кВ и тока 35 кА. Импульсная мощность ~ 600 МВт, что достаточно для запитки одной секции ускорителя. Индукторы выполнены на ферритовых сердечниках и по два заключены в общий металлический корпус. Подвод напряжения от двух диаметрально расположенных высоковольтных вводов к первичным виткам индукторов осуществляется полосковыми линиями. Фокусирующая катушка ленточного типа фиксируется с помощью специальных упоров, одновременно обеспечивающих контакт с диаграммами ускорительного тракта. Корпуса индукторов, объединенные в секции (рис.6) заполнены трансформаторным маслом.

Проведен расчет эквивалентного сопротивления индуктора (~ 10 Ом), позволивший выбрать волновое сопротивление подводящих полосковых линий и оценить их геометрические размеры. С целью выбора способа охлаждения проводится оценка в установленном тепловом режиме превышения температуры сердечника и фокусирующей катушки индуктора над температурой окружающей среды при работе индукционной и фокусирующей систем с частотой 50 Гц.

Дается описание комбинированного способа охлаждения конструктивных элементов и узлов, а также ускоряющей секции в целом, обеспечившего отвод рассеиваемой в секции мощности и работоспособность индукционной системы с частотой 50 Гц /9/.

Во втором параграфе приводятся основные результаты экспериментального исследования индукционной системы.

Показано, что величина волнового сопротивления подводящих полосковых линий индуктора соответствует расчетной. Суммарное напряжение одной ускоряющей секции,

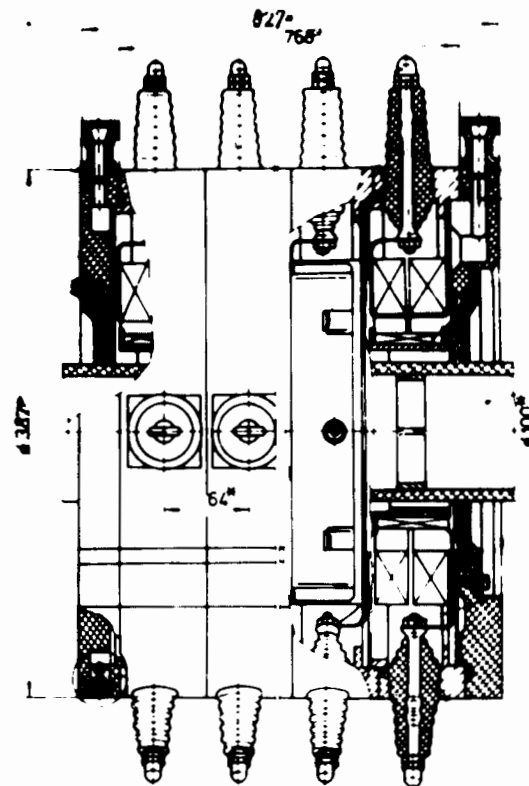


Рис.6. Конструкция ускоряющей секции.

Основные результаты исследования теплового режима работы индукционной системы сводятся к следующему. Перепад температуры между самой горячей (фокусирующая катушка) и самой холодной (корпус индуктора) точками не превышает 17 град. Охлаждая корпуса индукторов, можно эффективно охлаждать весь внутренний объем ускоряющей секции. С помощью водяных радиаторов удастся поддерживать температуру поверхности ускоряющей секции в пределах 40-50 град, что является достаточным для нормальной эксплуатации индукционной системы.

Приведены результаты измерения частотных характеристик индуктора.

В четвертой главе рассматриваются вопросы, связанные с экспериментальным исследованием электронного пучка ускорителя СИЛУНД-20 /5,10/ (рис.7).

В первом параграфе сформулированы требования к пучку ускорителя-инжектора: ток пучка ~ 500 А, эмиттанс не более $34 \mu\text{рад}\cdot\text{см}$, энергия $1,6 \pm 2,0$ МэВ и энергетический разброс $3 \pm 5\%$. Необходима высокая стабильность параметров.

Во втором параграфе приводятся методика и результаты исследования пучка после плазменного источника электронов. Дано описание экспериментальной измерительной

нагруженной пучком с током ~ 1 кА, составляет ~ 400 кВ. Приведена нагрузочная характеристика ускоряющей секции, позволяющая сделать вывод о том, что максимальная передача мощности в нагрузку (~ 400 МВт) происходит при токе ~ 1 кА.

Исследование температурных зависимостей проводилось с помощью термпар, установленных на фокусирующей катушке, упорах, фиксирующих катушку, ферритовом сердечнике и напоре одного из индукторов, собранных в секцию и заполненных трансформаторным маслом. Измерения происходили при следующих условиях: частота следования импульсов - 50 Гц, суммарное напряжение секции - 400 кВ, длительность импульса напряжения - 30 нс, амплитуда импульса тока в фокусирующих катушках - 2 кА, длительность импульса тока - 50 мкс.

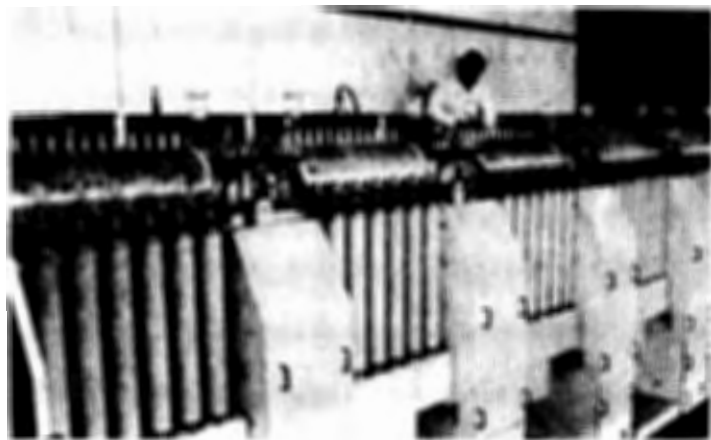


Рис.7. Внешний вид ускорителя СИЛУНД-20.

установки. Основные результаты исследования сводятся к следующему. Наблюдается смещение центра тяжести пучка от оси ускорителя ~ 5 мм. Пульсации огибающей пучка в однородном магнитном поле отсутствуют. Приведена зависимость диаметра пучка от величины фокусирующего поля. Диаметр пучка при фокусирующем поле $0,1$ Т составляет ~ 8 мм. Экспериментально снятая кривая расширения пучка примерно совпадает с теоретической кривой расширения в эквипотенциальном пространстве под воздействием кулоновских сил. Следовательно, расплывание пучка в основном определяется действием пространственного заряда. Замагниченность плазменного катода источника электронов незначительна.

Дано описание методики и экспериментальной установки для измерения эмиттанса. Эмиттанс измерялся методом диафрагмирования и составляет величину (100 ± 30) мрад·см для 60% тока пучка с энергией 400 кэВ.

Проведенные исследования продемонстрировали возможность использования пучка электронов, формируемого плазменным источником, в ускорителе СИЛУНД-20.

Третий параграф посвящен вопросам экспериментального исследования характеристик пучка ускорителя СИЛУНД-20. Приведены основные результаты исследования. Измерение тока с помощью поясов Роговского показало, что коэффициент токопрохождения превышает 95%. Ток на выходе ускорителя достигает 1 кА, энергия – 2 МэВ, энергетический разброс $(2,2 \pm 1)\%$. Измерения проводились для части пучка, соответствующей вершине импульса ускоряющего напряжения, для которой, как показали исследования временной структуры пучка, дифференциальные характеристики являются неизменными. С помощью многоканального датчика коллекторного типа определены размеры, положение центра тяжести и эмиттанс пучка. По повороту в азимутальном направлении проколлимированного щелью пучка, вышедшего из фокусирующего поля ускорителя, произведена оценка степени замгниченности плазменного катода источника электронов. Диаметр пучка на выходе из ускорителя достигает 20 мм, смещение центра тяжести от оси – 5 мм. Анализируются возможные причины появления смещения и характер движения пучка. Показано, что наличие смещения пучка

от оси приводит в азимутально-симметричном магнитном поле к движению по спирали, а при выходе из поля – к появлению когерентного угла, который необходимо корректировать с помощью, например, поперечного магнитного поля. Экспериментально установлено, что центр тяжести пучка ускорителя СИЛУНД-20 описывает в магнитном поле на плоскости, перпендикулярной оси, при изменении поля по величине окружность, проходящую через ось. Это характерно для пучка, полученного из источника с немагнитным катодом. Непосредственное измерение величины магнитного поля на плазменном катоде дает величину, не превышающую $\sim 4\%$ от амплитуды фокусирующего поля ускорителя.

На рис.8 представлена экспериментально снятое распределение тока по фазовому объему пучка ускорителя. Эмиттанс пучка с током ~ 500 А не превосходит 20% мрад·см.

В четвертом параграфе рассматриваются вопросы стабильности характеристик пучка и систем ускорителя. Получено выражение, позволяющее оценить величину нестабильности фазы колебаний пучка. Показано, что нестабильность амплитуды магнитного поля, ускоряющего напряжения и тока приводит к нестабильности фазы колебаний и, следовательно, когерентного угла при выходе из фокусирующего поля

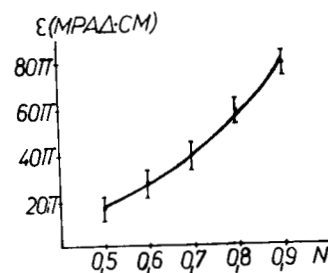


Рис.8. Распределение тока по фазовому объему пучка.

ускорителя. В этом случае корректировка когерентного угла является неэффективной.

Оценивается допустимый разброс значений когерентного угла ($\sim 0,003$ рад). Показано, что для обеспечения разброса значений когерентного угла от импульса к импульсу при выходе пучка из ускорителя меньше предельно допустимого, ускоряющее и фокусирующее поля необходимо стабилизировать с точностью не хуже $\pm 0,05\%$.

Приведены основные результаты экспериментального исследования стабильности характеристик пучка и систем ускорителя.

Определены величины нестабильности отдельных параметров. Использование схем стабилизации зарядного напряжения модуляторов и фокусирующего поля до величины, не превышающей $\pm 0,03\%$. При этом разброс значений когерентного угла снижается с $0,04$ рад до $0,02$ рад. Существует область значений магнитного поля и давления остаточного газа в источнике электронов, в которой амплитудная нестабильность тока источника не превышает 1% при частоте 50 Гц (рис.9).

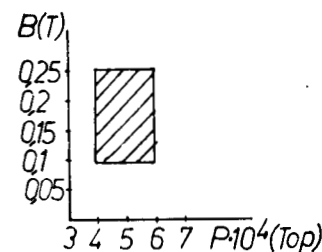
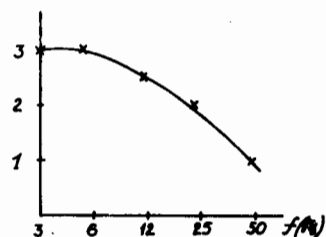


Рис.9. Область с нестабильностью тока менее 1%.

$\Delta I/I \cdot 100\%$ 

С уменьшением частоты нестабильность тока возрастает и достигает 3% при частоте 3 Гц (рис.10). В процессе ускорения амплитудная нестабильность тока несколько возрастает и достигает $\pm 2,5\%$. После 2000 часов работы ускорителя с частотой до 50 Гц изменений характеристик пучка и систем не наблюдается.

Рис.10. Зависимость нестабильности тока источника электронов от частоты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработаны и созданы основные системы ускорителя СИЛУНД-20 с параметрами: ток пучка до 1 кА, энергия до 2 МэВ, частота следования импульсов до 50 Гц, длительность импульса тока ~ 20 нс.
2. Разработан, создан, запущен в эксплуатацию и исследован источник электронов ускорителя СИЛУНД-20 плазменного типа, работающий с частотой до 50 Гц при токе пучка до 1,2 кА и энергии до 400 кэВ, имеющий ресурс работы холодного катода, превышающий 700 часов, и нестабильность тока пучка менее 1% при частоте 50 Гц.
3. Разработан, создан и исследован высоковольтный магнитный генератор наносекундных импульсов для предварительной ионизации газа в плазменном источнике электронов, в котором применены нелинейные схемы для обострения фронта, формирования спада и сжатия импульсной мощности при напряжении до 250 кВ.
4. Экспериментально показано, что существует, и определено пороговое значение давления остаточного газа в области холодного катода плазменного источника электронов при работе с частотой 50 Гц. При давлении меньше порогового ресурс работы холодного катода не превосходит нескольких секунд, а при давлении больше порогового - превышает 700 часов.
5. Разработана, создана и исследована система транспортировки пучка ускорителя СИЛУНД-20, работающая с частотой до 50 Гц при токе пучка до 1 кА и энергии до 2 МэВ. Система обеспечивает формирование фокусирующего магнитного поля микросекундной длительности с высокой однородностью и транспортировку пучка при коэффициенте токопрохождения, превышающем 95%.
6. Разработана, создана и исследована индукционная система ускорителя СИЛУНД-20, способная формировать электрическое поле напряженностью ~ 5 кВ/см и ускорять в этом поле электронный пучок с током до 1 кА и длительностью импульса тока ~ 20 нс при частоте следования импульсов до 50 Гц.
7. Экспериментально исследованы характеристики пучка ускорителя СИЛУНД-20 после источника электронов, в процессе ускорения и непосредственно на выходе из ускорителя.

8. Определены допуски на стабильность ускоряющего и фокусирующего полей.

9. Экспериментально показано, что существует, и определен диапазон параметров, в котором нестабильность тока плазменного источника электронов не превышает 1% при частоте 50 Гц.

10. Экспериментально показано, что существует, и определена зависимость нестабильности тока пучка плазменного источника электронов от частоты срабатывания в диапазоне 3-50 Гц.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Долбилов Г.В., Лебедев Н.И., Петров В.А., Петров В.А., Саранцев В.П., Сумбаев А.П., Фатеев А.А. Линейный индукционный ускоритель СИЛУНД-20. В кн.: Коллективные методы ускорения. ОИЯИ, Д9-82-664, Дубна, 1982, с.101.
2. Долбилов Г.В., Петров В.А., Петров В.А. Плазменный источник электронов. А.С. № 1140641 с приоритетом от 24 июня 1983 г. БИ, 1986, № 44.
3. Долбилов Г.В., Ковальски М., Лебедев Н.И., Петров В.А., Петров В.А., Фатеев А.А. Плазменный источник электронов. В кн.: Коллективные методы ускорения. ОИЯИ, Д9-82-664, Дубна, 1982, с.104.
4. Александров В.С., Белошицкий П.Ф., Беляев Л.Н.,..., Петров В.А.,..., Щорнак Г. Линейный индукционный ускоритель СИЛУНД-20. В кн.: Ускорительный комплекс тяжелых ионов в ОИЯИ. ОИЯИ, Р9-83-613, Дубна, 1983, с.54.
5. Долбилов Г.В., Ковальски М., Лебедев Н.И., Петров В.А., Петров В.А., Фатеев А.А. Исследования источника электронов ускорителя СИЛУНД-20. Сообщение ОИЯИ, Р9-82-70, Дубна, 1982.
6. Петров В.А., Петров В.А., Эберль У. Высоковольтный магнитный генератор наносекундных импульсов. ПТЭ, 1979, № 1, с.90; Препринт ОИЯИ, Р9-11036, Дубна, 1977.
7. Долбилов Г.В., Петров В.А., Петров В.А., Саранцев В.П., Сумбаев А.П., Фатеев А.А. Головной образец линейного индукционного ускорителя СИЛУНД-20. Сообщение ОИЯИ, 9-82-338, Дубна, 1982.
8. Долбилов Г.В., Петров В.А., Фатеев А.А. Линейный индукционный ускоритель электронов СИЛУНД-20. Сообщение ОИЯИ, Р9-86-290, Дубна, 1986.
9. Долбилов Г.В., Дубовик Л.В., Инкин В.Д., Лебедев Н.И., Николаев В.П., Петров В.А., Петров В.А., Саенко Т.П., Саранцев В.П., Сумбаев А.П., Фатеев А.А., Щеулин А.С., Щинов Б.Г. Коллективный ускоритель тяжелых ионов КУТИ-20. СИЛУНД-20, системы управления, контроля и диагностики. Сообщение ОИЯИ, Р9-83-307, Дубна, 1983.
10. Долбилов Г.В., Лебедев Н.И., Петров В.А., Фатеев А.А., Щинов Б.Г. Исследования пучка линейного индукционного ускорителя электронов СИЛУНД-20. Сообщение ОИЯИ, Р9-84-631, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 апреля 1990 года.