

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

K-144

9-91-117

**КАЗАЧА**

**Владимир Иванович**

УДК 621.384.6

**ЛИНЕЙНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ УСКОРИТЕЛЬ  
С СИЛЬНЫМ ВЕДУЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

**Специальность 01.04.20 - физика пучков  
заряженных частиц  
и ускорительная техника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук**

**Дубна 1991**

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,  
профессор

Э. А. ПЕРЕЛЬШТЕЙН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

Е. А. КОРНИЛОВ

кандидат физико-математических наук

А. А. ДРОЗДОВСКИЙ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Московский радиотехнический институт АН СССР.

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1991 года.

в " \_\_\_\_\_ " часов на заседании Специализированного совета  
Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ,  
г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1991 года.

Ученый секретарь Специализированного совета

доктор физико-математических наук

Ю. А. БАТУСОВ

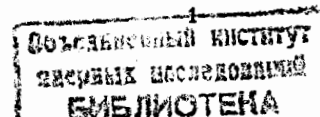
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Постоянный интерес во всем мире к ускорителям типа ЛИУ объясняется тем, что развитие такой области ускорительной техники как генерация сильноточных электронных пучков и управление их движением в настоящее время переходит в качественно новую фазу. Идет дифференциация сильноточных ускорителей по областям применения, улучшение качества пучков, воспроизводимости от импульса к импульсу их параметров и использование машин как надежного, удобного инструмента при проведении физических исследований. С развитием такого направления мощной ускорительной техники связывается в настоящее время прогресс в разработке и исследовании проблем термоядерного синтеза, лазеров на свободных электронах (ЛСЭ), мощных импульсных генераторов и усилителей СВЧ-мощности сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн; исследовании новых схем, направленных на создание высокоградиентных ускорителей будущего. Расширяется применение ЛИУ в промышленности для стерилизации медицинских инструментов и обработки экологически вредных отходов ядерной энергетики.

Цель работы заключалась в разработке, исследовании и создании нового индукционного ускорителя с сильным ведущим магнитным полем ( $B_z$  до 1,5 Тл), высоким темпом ускорения электронных пучков с током до 1,5 кА ( $E_z$  до 10 кВ/см) и высокой однородностью полей, предназначенного для проведения исследований в области релятивистской СВЧ-электроники, а также для проведения экспериментов по усилению СВЧ-излучения в черенковской ЛБВ.

Научная новизна. Впервые создана и экспериментально исследована секция ЛИУ с сильным ведущим магнитным полем (до 1,5 Тл) позволяющая реализовать темп набора энергии 10 кэВ/см при токах электронного пучка до 1,5 кА и длительности плато импульса ускоряющего напряжения 60 нс, предназначенная для проведения исследований в области релятивистской СВЧ-электроники.

Предложена и реализована конструкция магнитной системы и



ускорительного тракта ЛИУ, обеспечивающие получение высокого уровня однородности электрического и магнитного полей.

Найдены корреляционные функции магнитного поля, связанные со случайным разбросом координат центров фокусирующих катушек относительно оси ЛИУ. Получены аналитические выражения, позволяющие оценивать обусловленные этим разбросом осей катушек величины когерентного угла и амплитуды прецессии центра масс первоначально незамагниченного прямого пучка на выходе ЛИУ в зависимости от параметров магнитной структуры ускорителя.

Теоретически и экспериментально показано, что с увеличением темпа ускорения замагниченного трубчатого электронного пучка увеличивается время развития диокотронной неустойчивости. Предложен новый способ её подавления с помощью анизотропного экрана, в котором запрещено протекание аксиальных токов.

Впервые в экспериментах на пучке ЛИУ использован новый тип усилителя - черенковская ЛБВ с высоким погонным пространственным коэффициентом усиления мощности волны и проведены эксперименты по усилению одномодового ( $E_{01}$ ) СВЧ-излучения с длиной волны  $\lambda=8,2$  мм.

#### Практическая ценность.

Проведенные исследования и эксперименты с созданной секцией ЛИУ позволили получить данные, которые используются при разработке и создании других ЛИУ (МИФИ, МРТИ, ИТЭФ-Москва, НИИЭФА-Ленинград), а также используются при разработке компактного ЛИУ следующего поколения (Дубна, ОИЯИ), рассчитанного на работу с частотой до 400 Гц и предназначенного для генерации мощного СВЧ-излучения в области сантиметровых и миллиметровых длин волн.

Проведенные эксперименты с 8 миллиметровым усилителем в черенковской ЛБВ также позволили получить данные, которые используются при создании источника мощного СВЧ-излучения на базе ЛИУ, являющегося возможным вариантом источника СВЧ-мощности для запитки высокоградиентных диафрагмированных волноводов в ускорителях будущего (ОИЯИ, Дубна).

На ускорителях, собранных из созданных секций ЛИУ, ведутся эксперименты по релятивистской СВЧ-электронике: исследуется работа ЛСЭ, возбуждение магнитного циклотронного авторезонанса и др.

Полученные теоретические результаты были использованы в работах по коррекции параметров пучка электронов на выходе ЛИУ СИЛУНД-20 (ОИЯИ, Дубна).

#### Публикации и апробация работы.

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, изложены в 10 публикациях, приведенных в списке литературы.

Результаты работы докладывались на VI-ой Международной конференции по линейным ускорителям "LINAC-86" (Станфорд, США, 1986г.); на VII-ой Международной конференции по мощным пучкам частиц "BEAMS-88" (Карлсруэ, ФРГ, 1988г.) и VIII-ой Международной конференции "BEAMS-90" (Новосибирск, 1990г.); на II-ой Европейской конференции по ускорителям частиц (Ница, Франция, 1990г.); на IX, X и XI Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1984, 1986 и 1988 гг.); на VII-ом Всесоюзном симпозиуме по сильноточной электронике (Новосибирск, 1988г.); на VI и VII Всесоюзных семинарах по высокочастотной релятивистской электронике (Новосибирск, 1988г. и Свердловск, 1990г.), а также на семинарах Ускорительного отделения ЛСВЭ ОИЯИ.

#### На защиту выносятся.

1. Разработка и создание нового линейного индукционного ускорителя с сильным ведущим магнитным полем и высоким темпом ускорения, позволяющего получать сильноточные трубчатые замагниченные электронные пучки для задач релятивистской СВЧ-электроники.

2. Результаты теоретического исследования влияния разброса координат центров катушек (расположенных периодически и создающих ведущее магнитное поле  $B_z$ ) относительно геометрической оси ЛИУ, определяющие величины когерентного угла и амплитуду прецессии центра тяжести незамагниченного на катоде прямого электронного пучка на выходе ускорителя и показывающие квазирезонансный характер

влияния магнитной структуры ЛИУ на выходные параметры ускоренного пучка.

3. Экспериментальное доказательство возможности повышения величины импульсного ведущего магнитного поля  $B_z$  в ЛИУ без снижения темпа ускорения электронного пучка с помощью экранировки медными дисками пермаллоевых сердечников.

4. Теоретическое и экспериментальное доказательство возможности увеличения времени развития диокотронной неустойчивости замагниченного трубчатого электронного пучка при увеличении энергии инжекции пучка в секцию ЛИУ и увеличении темпа его ускорения.

5. Предложенный метод существенного повышения эффективности подавления диокотронной неустойчивости замагниченного трубчатого пучка электронов с помощью коаксиального цилиндрического анизотропного экрана, в котором запрещено протекание аксиальных токов, по сравнению со сплошным металлическим экраном.

6. Результаты экспериментов по использованию ускоренного в секции ЛИУ с сильным ведущим магнитным полем трубчатого электронного пучка в усилителе черенковского типа для получения усиленного одномодового ( $E_{01}$ ) СВЧ-излучения миллиметрового диапазона длин волн с высоким пространственным коэффициентом усиления мощности волны 1,5 дБ/см.

#### Структура диссертации.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, включающего 91 наименование. Диссертация содержит 111 страниц машинописного текста, в том числе 27 страниц иллюстрированного материала.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении охарактеризован современный этап развития линейных индукционных ускорителей, обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, кратко изложено содержание всех глав, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается описание основных систем разработанного и созданного ЛИУ с сильным ведущим магнитным

полем.

В §1 определяются основные требования к системам разрабатываемого ЛИУ: величины  $E_z$  и  $B_z$  ( $E_z = 10$  кВ/см и  $B_z = 1,3+1,4$  Тл); амплитуда ( $U_a = 60$  кВ) и длительность ( $\Delta t = 60+70$  нс) ускоряющего напряжения на индукторах; величина максимально допустимого градиента  $\partial V_z / \partial z$  в отдельных пульсациях и т.д. Приводится общая структурная схема всех систем секции ЛИУ и описание её конструкции. Общий вид ускоряющей секции показан на рис. 1. На рис. 2 показана конструкция отдельного индуктора.

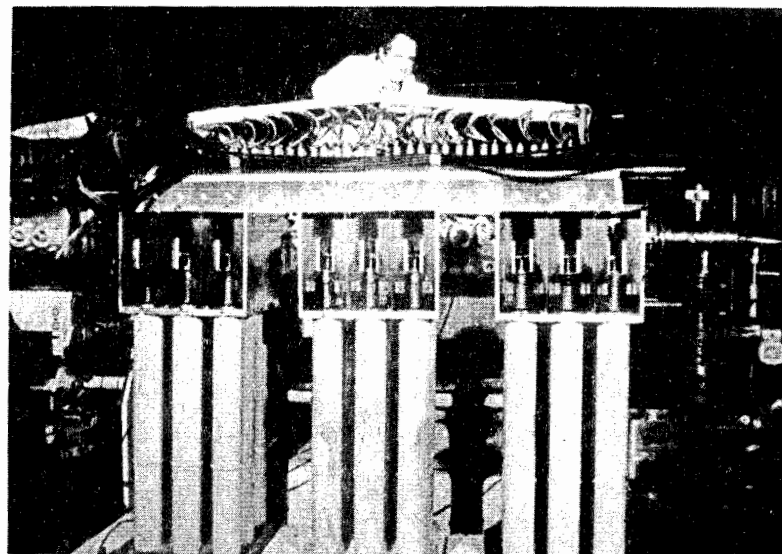


Рис. 1. Общий вид ускоряющей секции ЛИУ.

Существующий всегда разброс (до 1,5+2-х раз) динамических сопротивлений пермаллоевых сердечников может приводить к формированию неоднородной нагрузки для окончных каскадов модулятора и в результате к формированию неоднородного по длине секции ускоряющего электрического поля. В §2 рассматривается возможность применения методики, развитой для измерения динамических характеристик малогабаритных ферромагнитных сердечников к крупногабаритным сердечникам ЛИУ<sup>2/</sup>. Приводятся результаты измерения динамических кривых

перемангничивания  $\Delta B(Q_d)$  ( $Q_d$  - приведенный заряд), коэффициента переключения  $S_v$  и приведенного динамического сопротивления  $r_m$  для пермаллоевых сердечников марки 50 НП. Показывается, что отличие измеренных по вольт-амперным характеристикам значений максимального и среднего динамического сопротивления сердечников от их рассчитанных величин не превышает 15%.

В §3 дается описание системы формирования ускоряющего электрического поля - модулятора, выполненного с применением нелинейных схем усиления мощности путем сжатия

электромагнитной энергии во времени. Его основные параметры: выходное напряжение на эквивалентной нагрузке  $\rho=0,75$  Ом до 75 кВ; ток в нагрузке  $I = 100$  кА; длительность плато импульса 60 нс; мощность 7,5 ГВт; КПД  $\approx 60\%$ .

В §4 дается подробное описание системы формирования ведущего магнитного поля ЛИУ, межсекционных соленоидов и системы питания фокусирующих катушек, приводятся результаты расчета зависимостей величин  $B_z$  и  $\partial B_z / \partial z$  от геометрических параметров периодической магнитной структуры ЛИУ и выбранные значения этих параметров, обеспечивающие необходимую однородность  $B_z$  в ускоряющих секциях<sup>3/</sup>. Приводится также методика расчета величин  $B_z$  и  $\partial B_z / \partial z$  в межсекционных соленоидах, а также их рассчитанные зависимости от аксиальной координаты  $z$ <sup>4/</sup>.

В §5 приводятся экспериментальные результаты по формированию в

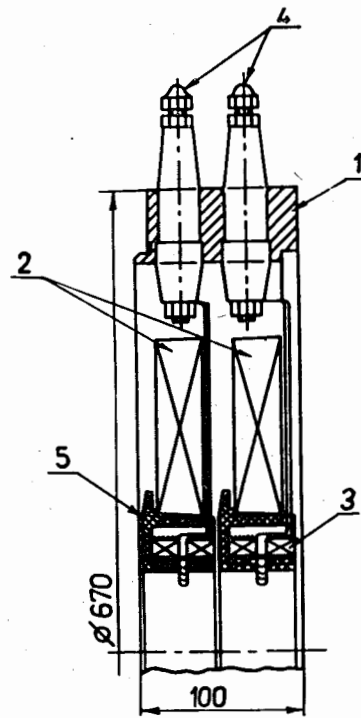


Рис 2.

Конструкция индуктора:  
1-корпус; 2-пермаллоевые сердечники;  
3-катушки; 4-высоковольтные изоляторы;  
5-капролоновые обоймы.

процессе магнитных измерений магнитного поля  $B_z$  в секциях и межсекционных соленоидах ЛИУ. В результате показано, что созданные узлы магнитной системы ЛИУ и ее питания способны обеспечивать при частоте работы до 1 Гц получение величины  $B_z$  до 1,5 Тл с относительным градиентом  $\frac{r}{B_z} \cdot \frac{\partial B_z}{\partial z}$  (при  $r$  до 4 см) не превышающим величины  $8 \cdot 10^{-3}$ . Экспериментально также показано существенное уменьшение (с 30% до 8%) влияния импульсного  $B_z$  на амплитуду ускоряющего напряжения на индукторах с помощью экранировки пермаллоевых сердечников медными дисками.

Конструкция магнитной системы ЛИУ оказывает влияние и на процесс ускорения немагнитных на катоде прямых электронных пучков. В §6 теоретически исследуется влияние существующего всегда в реальной магнитной системе ЛИУ случайного разброса осей отдельных катушек фокусирующего магнитного поля относительно оси ускорителя на выходные параметры ускоренного первоначально немагнитного прямого электронного пучка. Показывается, что этот разброс приводит к прецессии центра масс ускоряемого пучка, увеличению его обобщенного момента и появлению у частиц когерентного угла на выходе ускорителя. Определяются корреляционные функции магнитного поля, связанные со случайным разбросом осей катушек и оцениваются величины когерентного угла и смещения пучка в зависимости от параметров магнитной структуры ЛИУ<sup>5/</sup>. Далее показывается, что влияние на характеристики ускоренного пучка как его начального смещения на катоде, так и случайного разброса в положении фокусирующих катушек может быть существенно ослаблено адиабатическим увеличением  $B_z$  по тракту ускорителя пропорционально  $\gamma$  ( $\gamma$  - лоренц-фактор)<sup>6/</sup>.

Глава II посвящена вопросам формирования и ускорения трубчатого электронного пучка в секции ЛИУ с сильным  $B_z$ . В §1 дается описание электронного источника (ЭИ) с взрывоэмиссионным замагнитненным катодом, размещенным в первой трети ускоряющей секции (рис. 3)<sup>7/</sup>. Катод (К) и анод (А) выполнены из графита. В диоде предусмотрены возможности:

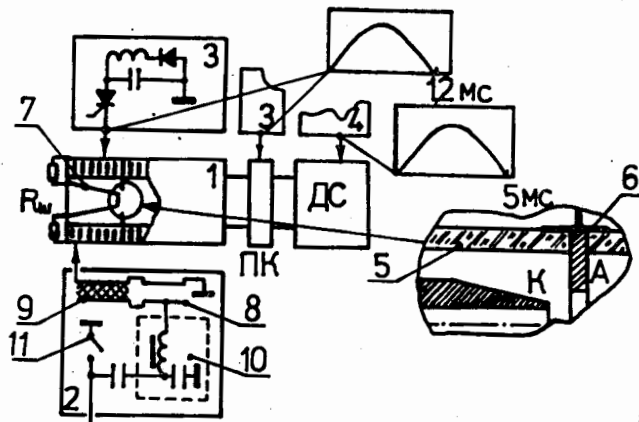


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:

1-секция ЛИУ; 2-модулятор; 3 и 4 - система питания магнитного поля; 5-ускорительная трубка; 6-отрезок титановой трубы; 7-катододержатель; 8-линейная и 9-нелинейная формирующие линии; 10-магнитные звенья сжатия мощности и 11-коммутатор; ДС-дополнительный соленоид; ПК-переходная камера межсекционного соленоида.

изменять диаметр катода от 5 до 20 мм; изменять расстояние анод-катодного промежутка от 0 до 15 см; юстировка катода и анода относительно оси катушек ведущего магнитного поля. Импульсное ускоряющее напряжение в ЭИ формируется шестью первыми индукторами секции и суммируется на металлическом катоде (7). Возбуждение первых шести индукторов осуществляется от первых двух оконечных каскадов модулятора.

В §2 описываются диагностические устройства, применявшиеся в экспериментах с трубчатым пучком: высоковольтные делители; цилиндр Фарадея; пояса Роговского; способ измерения автографов пучка; многофольговый датчик, работающий в токовом режиме и предназначенный для измерения энергетического спектра ускоренного замагниченного трубчатого пучка.

В §3 приведены экспериментальные результаты по формированию трубчатого пучка электронов, полученные на одной

секции созданного ЛИУ (рис. 4 и 5). Измеренная максимальная энергия ускоренных в секции электронов составляет  $E_b = 1,5$  МэВ; максимальная полученная мощность в пучке  $W = 2$  ГВт.

Глава III посвящена получению мощного СВЧ-излучения на длине волны  $\lambda = 8,2$  мм в черенковской ЛБВ на одной секции созданного ЛИУ.

К настоящему времени на базе сильноточных электронных ускорителей реализовано довольно много релятивистских СВЧ-генераторов различных типов. Одна из существенных трудностей, стоящих на пути повышения мощности и частоты излучения таких генераторов при сохранении когерентности сигнала, заключается в необходимости обеспечить в течение

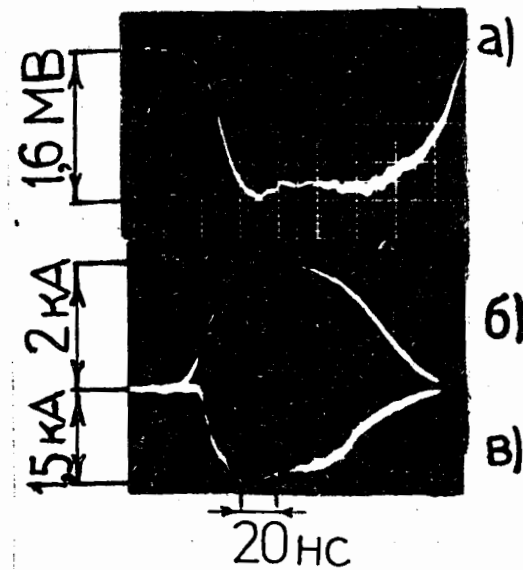


Рис. 4: а) импульс суммарного напряжения на ускоряющей секции; б) осциллограмма тока в диоде; в) осциллограмма тока ускоренного пучка на выходе секции.

короткой длительности импульсов тока установление режима эффективного взаимодействия электронного потока лишь с одной выбранной модой электродинамической системы. Указанная проблема снимается при использовании вместо генераторных схем усилительных. В этом случае малая длительность импульсов не только не является помехой, но и

позволяет получать очень высокие коэффициенты усиления волны за счет временной развязки излучения на входе и выходе прибора. Для

получения большой импульсной мощности СВЧ-излучения (при сравнительно небольшой средней мощности) одними из наиболее простых и эффективных в диапазоне миллиметровых волн являются

приборы, основанные на индуцированном черенковском излучении прямолинейных электронных потоков.

Поле синхронной гармоник в черенковской ЛБВ спадает в поперечном от электродинамической структуры (ЭДС) направлении в масштабе:

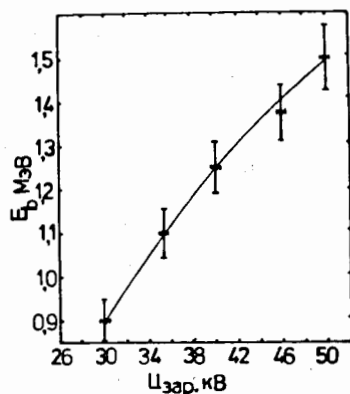


Рис. 5. Зависимость энергии пучка от напряжения на накопительной емкости модулятора.

Зависимость энергии пучка от напряжения на накопительной емкости модулятора. Взаимодействие с черенковской ЛБВ, а величина  $L_{\perp}$  определяет характерное расстояние от электронного пучка до ЭДС (в нашем случае  $L_{\perp} < 2$  мм). Однако в трубчатом электронном пучке, ускоренном в магнитном поле, развивается диокотронная неустойчивость, приводящая, в конечном счете, к его разрушению (разбиению пучка на отдельные токовые нити). С точки зрения задач генерации или усиления СВЧ-излучения этот эффект приводит к возбуждению лишних паразитных мод, а также вследствие уменьшения средней плотности пучка  $\bar{j}_z$  к уменьшению генерируемой СВЧ-мощности.

В §1 обсуждаются вопросы транспортировки трубчатого электронного пучка в сильном продольном магнитном поле. Теоретически и экспериментально показывается, что наиболее эффективными способами ослабления диокотронной неустойчивости являются увеличение как энергии инжекции пучка в ускоряющее поле  $E_z$ , так и увеличение темпа ускорения в секции ЛИУ для того, чтобы использовать наиболее резкую зависимость обратного пространственного инкремента этой неустойчивости от  $\gamma$  ( $\sim \gamma^2$ ). На рис. 6 показаны отпечатки пучка, полученные при  $E_z = 3$  кВ/см (а) и  $E_z = 7$  кВ/см (б) [9].

Предлагается новый способ подавления диокотронной

$$L_{\perp} \approx \beta_{\perp} \cdot \gamma \cdot \frac{\lambda}{2\pi}, \quad (1)$$

где  $\beta_{\perp} = v_{\perp} / c$ ;  $v_{\perp}$  - аксиальная скорость электронов,  $c$  - скорость света. Поэтому трубчатая форма пучка обеспечивает наилучшую эффективность взаимодействия с черенковской ЛБВ, а величина  $L_{\perp}$  определяет характерное расстояние от электронного пучка до ЭДС (в нашем случае  $L_{\perp} < 2$  мм). Однако в трубчатом электронном пучке, ускоренном в магнитном поле, развивается диокотронная неустойчивость, приводящая, в конечном счете, к его разрушению (разбиению пучка на отдельные токовые нити). С точки зрения задач генерации или усиления

неустойчивости трубчатого электронного пучка с помощью анизотропного экрана, в котором запрещено протекание аксиальных токов. Получено модифицированное дисперсионное уравнение, учитывающее взаимодействие трубчатого электронного пучка с анизотропным экраном. Теоретически показывается существенное увеличение эффективности подавления диокотронной неустойчивости с помощью анизотропного экрана по сравнению со сплошным металлическим экраном.

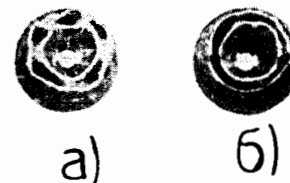


Рис. 6. Отпечатки ускоренного электронного пучка на луженой жести.

В §2 изложена теоретическая модель получения мощного СВЧ-излучения в черенковской ЛБВ. В режиме малого сигнала (безразмерная амплитуда поля синхронной волны  $|F| \ll 1$ ) нарастание усиленной волны описывается зависимостью:

$$F(z) = \frac{F_0}{\rho} \cdot \exp\left(\alpha \cdot \frac{\pi \sqrt{z}}{2} \cdot \frac{c_0}{\gamma^2} \cdot \frac{z}{\lambda}\right), \quad (2)$$

где коэффициенты  $\alpha$  и  $\rho$  определяются расстройкой синхронизма,  $F_0$  - безразмерная амплитуда поданой на вход ЛБВ электромагнитной волны,  $c_0$  - аналог классического параметра Пирса, пропорциональный току пучка  $I_b$  и сопротивлению связи электронов с волной  $Z$ :  $c_0 = (Z \cdot I_b)^{1/3}$ .

В §3 дается описание схемы эксперимента (рис. 7) и приводятся полученные результаты.

Замедляющий волновод (1) располагался в дополнительном соленоиде по оси пучка (2) и находился в магнитном поле, создаваемом катушками ДС(3). Входной сигнал на волне  $\lambda = 8,2$  мм подавался в замедляющий волновод от магнетрона (4) по волноводному тракту (5) с ослаблением 2 дБ с помощью квазиоптического зеркала (6), которое имело отверстие для пролета пучка. Зеркало с помощью приспособления (7)

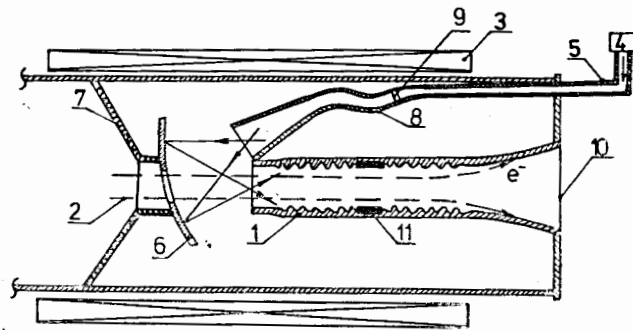


Рис. 7. Схема эксперимента: 9 и 10 - вакуумные окна;  
11 - СВЧ-поглотитель.

располагалось перед замедляющим волноводом так, чтобы уровень ВЧ-мощности из магнетрона был максимальным. Волна из магнетрона направлялась на квазиоптическое зеркало через специальный преобразователь (8), в котором происходила трансформация типов волн по схеме  $H_{10} \rightarrow H_{11} \rightarrow E_{01}$ .

В эксперименте использовались пучки с энергией  $E_b = 800$  кэВ ( $\beta \approx 0,83$ ) и током  $\sim 400$  А (рис. 8а)<sup>10/</sup>. В соответствии с расчетом в эксперименте было получено погонное усиление волны  $\sim 1,5$  дБ/см. При энергии частиц, лежащей в полосе усиления, длительность СВЧ-импульса была близка к длительности тока (рис. 8б). Выходное излучение состояло, в основном, из волн  $E_{01}$ . Измеренная максимальная мощность излучения составляла  $\sim 30$  МВт при суммарном пространственном коэффициенте усиления  $\sim 35+38$  дБ и КПД  $\sim 10\%$ . Длительность импульса составляла  $\sim 30$  нс на полувьсоте.

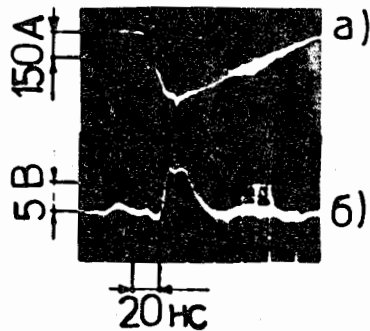


Рис. 8: а) осциллограмма тока электронного пучка на входе в ЛБВ; б) осциллограмма сигнала с детектора усиленного СВЧ-излучения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ  
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ:

1. Разработан и создан линейный индукционный ускоритель с индукцией ведущего магнитного поля  $B_z$  до 1,5 Тл и напряженностью электрического поля  $E_z$  до 10 кВ/см, позволяющий осуществлять ускорение сильноточных трубчатых замагниченных электронных пучков для задач релятивистской СВЧ-электроники. Проанализированы методы подавления диокотронной неустойчивости в трубчатом электронном пучке. Проведены эксперименты по ускорению сильноточных трубчатых пучков в созданном ЛИУ, измерены электротехнические параметры ускоряющих секций, параметры трубчатых электронных пучков с токами до 1,5 кА и энергией до 1,5 МэВ. Экспериментально реализовано усиление 8,2 мм СВЧ-излучения в черенковской ЛБВ на базе электронного пучка ЛИУ.

2. Предложена и реализована конструкция магнитной системы и ускорительного тракта ЛИУ, обеспечивающих получение высокого уровня однородности электрического и магнитного полей. Разработана, создана и налажена система формирования ведущего магнитного поля секций ЛИУ. Экспериментально показано, что созданные узлы магнитной системы способны обеспечивать при частоте работы  $\nu=1$  Гц получение величины  $B_z$  до 1,5 Тл в апертуре диаметром 170 мм с максимальным относительным градиентом  $\frac{r}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial z}$  (до радиуса  $r=4$  см) в ускоряющих секциях  $2,5 \cdot 10^{-3}$  и в межсекционных соленоидах  $\sim 8 \cdot 10^{-3}$  при относительной азимутальной неоднородности  $B_z$  не более  $3 \cdot 10^{-3}$ .

3. Впервые создана и экспериментально исследована ускоряющая секция ЛИУ с сильным ведущим магнитным полем ( $B_z$  до 1,5 Тл), позволяющая при уровне подводимой к индукторам импульсной мощности до 7,5 ГВт реализовать темп набора энергии до 10 кэВ/см при токах электронного пучка до 1,5 кА и длительности импульса 60 нс. Экспериментально достигнутый КПД преобразования подводимой к индукторам мощности в мощность



пучка составляет ~25%.

4. Найдены корреляционные функции магнитного поля, связанные со случайным разбросом координат центров фокусирующих катушек относительно геометрической оси ЛИУ. Получены аналитические выражения, позволяющие оценивать обусловленные этим разбросом осей катушек масштаб увеличения обобщенного момента, а также величины когерентного угла и амплитуды прецессии центра масс первоначально незамагниченного прямого пучка на выходе ЛИУ в зависимости от параметров магнитной структуры ускорителя. Влияние на характеристики ускоренного в ЛИУ незамагниченного пучка электронов как начального смещения центра тяжести пучка, так и случайного разброса в положении фокусирующих катушек может быть существенно ослаблено адиабатическим увеличением индукции продольного фокусирующего магнитного поля по тракту ускорителя.

5. Теоретически и экспериментально показано, что с увеличением напряженности ускоряющего электрического поля  $E_z$  в секции ЛИУ увеличивается время развития диокотронной неустойчивости. Получено соотношение, связывающее величину её обратного пространственного инкремента  $\Gamma_d$  с энергией инжекции пучка в секцию  $\epsilon_0$ , длиной ускорения  $z$  и величиной  $E_z$ . Экспериментально продемонстрирована большая длина транспортировки ( $\sim 1,8$  м) трубчатого замагниченного пучка электронов при высоком темпе ускорения без существенного нарушения его качества диокотронной неустойчивостью, что позволяет ускорять трубчатые электронные пучки до высоких энергий, располагать электродинамические структуры на больших расстояниях от диода и расширить возможности эксперимента.

6. Предложен новый способ подавления диокотронной неустойчивости трубчатого электронного пучка с помощью анизотропного экрана, в котором запрещено протекание аксиальных токов.

7. Впервые в экспериментах на пучке ЛИУ использован новый тип усилителя - черенковский (тип ЛБВ) с высоким погонным

пространственным коэффициентом усиления мощности волны  $\sim 1,5$  дБ/см. Экспериментально получено одномодовое ( $E_{01}$ ) СВЧ-излучение на длине волны  $\lambda=8,2$  мм с малой примесью паразитных мод (меньше 15% по мощности). Максимальная мощность на выходе составила  $\sim 30$  МВт при длительности излучения на полувисоте импульса  $\sim 30$  нс, суммарном коэффициенте пространственного усиления 35+38 дБ и КПД $\approx$ 10%.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.С.Александров, И.И.Голубев, Г.В.Долбилов, В.И.Казача, Г.И. Коннов, В.П. Рашевский, В.П. Саранцев, А.И. Сидоров. Линейный индукционный ускоритель электронно-ионных колец ЛУЭК-20. Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. II, Дубна, 1987, с. 193.
2. В.И. Казача, А.К. Красных. Измерение динамических характеристик ферромагнитных сердечников индукторов ЛИУ. Сообщение ОИЯИ, Р9-84-231, Дубна, 1984.
3. Н.Ю. Казаринов, В.И. Казача. О допусках на электрическое и магнитное поля в индукционной ускоряющей системе КУТИ-20. Сообщение ОИЯИ, Р9-83-148, Дубна, 1983.
4. В.С.Александров, И.И. Голубев, Г.В.Долбилов, В.И.Казача, В.П. Рашевский, В.П. Саранцев. Система формирования ведущего магнитного поля линейного индукционного ускорителя электронно-ионных колец ЛУЭК-20 (I очередь). Сообщение ОИЯИ, 9-86-157, Дубна, 1986.
5. Н.Ю. Казаринов, В.И. Казача. О допусках на случайный разброс осей катушек фокусирующего магнитного поля в линейных индукционных ускорителях. Сообщение ОИЯИ, Р9-87-24, Дубна, 1987.
6. Ю.И. Алексахин, Н.Ю. Казаринов, В.И. Казача. О требованиях к фокусирующему магнитному полю в ЛИУ. Труды VII Всесоюзного симпозиума по сильноточной электронике, часть II, Томск, 1988, с. 88; Препринт ОИЯИ, Р9-87-852, Дубна, 1987.

7. О.В. Архипов, Л.Б. Бобылева, В.И. Казача, Г.И. Коннов, А.К. Красных, И.В. Кузнецов, А.Ю. Никитский, Э.А. Перельштейн, А.И. Сидоров. Формирование и ускорение сильноточного трубчатого пучка электронов в модифицированной секции ЛИУ. Сообщение ОИЯИ, Р9-89-613, Дубна, 1989.
8. Ю.И. Алексахин, В.И. Казача, Э.А. Перельштейн. Качественная теория диокотронной неустойчивости и методы ее подавления. Труды VII Международной конференции по мощным пучкам частиц (BEAMS-88), т. II, Карлсруэ (ФРГ), 1988, с. 928; Препринт ОИЯИ, Е9-88-464, Дубна, 1988.
9. Э.Б. Абубакиров, О.В. Архипов, Л.Б. Бобылева, И.Е. Ботвинник, В.Л. Братман, Д.В. Виноградов, Г.Г. Денисов, В.И. Казача, Г.И. Коннов, А.К. Красных, И.В. Кузнецов, А.Ю. Никитский, М.М. Офицеров, Э.А. Перельштейн, А.И. Сидоров. Формирование и ускорение сильноточного трубчатого электронного пучка в ЛИУ и получение мощного СВЧ-излучения миллиметрового диапазона в черенковской ЛБВ. Труды II Европейской конференции по ускорителям частиц, т. I, Ница (Франция), 1990, с. 34; Препринт ОИЯИ, Е9-90-407, Дубна, 1990.
10. Э.Б. Абубакиров, И.Е. Ботвинник, В.Л. Братман, Д.М. Виноградов, Г.Г. Денисов, В.И. Казача, А.К. Красных, М.М. Офицеров, Э.А. Перельштейн, А.И. Сидоров. Получение мощного СВЧ-излучения диапазона миллиметровых волн в черенковской ЛБВ с релятивистским сильноточным электронным пучком. ЖТФ, т. 60, № 11, 1990, с. 186.

Рукопись поступила в издательский отдел  
5 марта 1991 года.