

A. 46

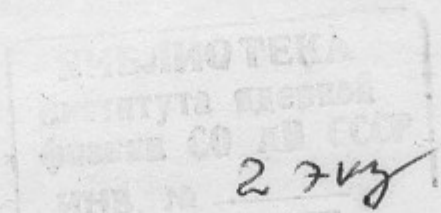
1997



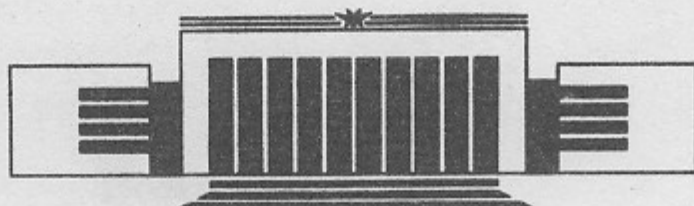
Государственный научный центр  
Российской Федерации  
Институт ядерной физики  
им. Г.И. Будкера

А.В. Александров, М.С. Авилов, А.В. Антошин,  
П.А. Бак, О.Ю. Баженов, Ю.М. Боймельштейн,  
Р.Х. Галимов, К.В. Губин, Н.С. Диканский,  
А.Г. Иголкин, И.В. Казарезов, В.Э. Карлин,  
Н.А. Киселева, С.Н. Ключев, О.В. Корозников,  
А.Н. Косарев, Н.Х. Кот, Д.Е. Куклин,  
А.Д. Лисицин, П.В. Логачев, Л.А. Мироненко,  
А.В. Новохатский, В.М. Павлов, И.Л. Пивоваров,  
А.М. Резаков, В.С. Северило, Ю.И. Семенов,  
Б.А. Скарбо, А.Н. Скринский, Д.П. Суханов,  
Ю.Ф. Токарев, А.В. Филиппов, А.Р. Фролов,  
В.Д. Хамбигов, А.Н. Шарапа, А.В. Шемякин,  
С.В. Шиянков.

ИСПЫТАНИЕ ПРОТОТИПА  
ФОРИНЖЕКТОРА ВЭПП-5



ИЯФ 97-64



НОВОСИБИРСК



## Испытание прототипа форинжектора ВЭПП-5

А.В. Александров, М.С. Авилов, А.В. Антошин, П.А. Бак,  
О.Ю. Баженов, Ю.М. Боймельштейн, Р.Х. Галимов, К.В. Губин,  
Н.С. Диканский, А.Г. Иголкин, И.В. Казарезов, В.Э. Карлин,  
Н.А. Киселева, С.Н. Ключев, О.В. Корозников, А.Н. Косарев,  
Н.Х. Кот, Д.Е. Куклин, А.Д. Лисицин, П.В. Логачев,  
Л.А. Мироненко, А.В. Новохатский, В.М. Павлов, И.Л. Пивоваров,  
А.М. Резаков, В.С. Северило, Ю.И. Семенов, Б.А. Скарбо,  
А.Н. Скринский, Д.П. Суханов, Ю.Ф. Токарев, А.В. Филиппов,  
А.Р. Фролов, В.Д. Хамбиков, А.Н. Шарапа,  
А.В. Шемякин, С.В. Шиянков.

ИЯФ им. Г.И. Будкера, 630090 Новосибирск, Россия.

### Аннотация

Прототип форинжектора ВЭПП-5 был создан для проведения комплексных испытаний элементов ускоряющего тракта. Он представляет собой начальную часть форинжектора и включает в себя его основные элементы: электронную пушку, группирователь, одну ускоряющую секцию, ВЧ модуль на базе клистрона КИУ - 12, систему умножения мощности, фокусирующую систему и систему диагностики пучка. В работе приведены основные результаты испытаний прототипа с ускоряющей секцией длиной 2.5 м. Получен средний темп ускорения электронного пучка  $17 \text{ МэВ/м}$  с полным зарядом  $1.2 \cdot 10^{10}$  частиц в импульсе.

## 2 ВЧ-питание стояка

Напряжение ВЧ-сигнала ( $U = 61.8 \text{ МВ}$ ,  $U = 100 \text{ мВ}$ ) с заданного генератора-литматора (частота ускорителя частоты поступает на дискретный делитель частоты) поступает на вход клистрона КИУ-12. Выходной сигнал клистрона поступает на вход входной секции (УС) по вакуумному волноводу (70 см, 34 ГГц) через умножитель мощности типа SLED (получает на вход сигнал от входной секции УС). На выходе УС располагается согласующий трансформатор. Мощность сигнала системы SLED через волноводные и направляющие ответвители ( $\alpha_{\text{отв}} \approx 28 \text{ дБ}$ ) отвечает для питания ВЧ-группирователя. Амплитуда и форма ВЧ-импульса, поступающего в группирователь регулировалась с помощью У-термистора и фазовращателя.

### Введение.

В настоящее время в Институте Ядерной физики создан прототип форинжектора для Ф и с-т фабрик [1, 2] — стенд. Цель создания прототипа — комплексное испытание элементов начальной части форинжектора.

Стенд состоит (см. рис. 1) из термоэлектронной пушки, системы ВЧ-питания, субгармонического группирователя, ВЧ-группирователя на основной частоте, одной ускоряющей секции, фокусирующей системы, системы термостабилизации, системы диагностики и управления. В ходе настоящих экспериментов субгармонический группирователь не использовался.

## 1 Высоковольтная пушка

Для получения пучка использовалась электронная термопушка [3]. Основные выходные параметры пушки приведены в таблице 1.

Рабочая энергия электронного пучка	100 кэВ
Длительность токового импульса (ширина на полувысоте)	2.5 нс
Число электронов в импульсе	$5 \cdot 10^{10}$
Частота повторения	до 50 Гц

Таблица 1: Основные параметры электронной термопушки.



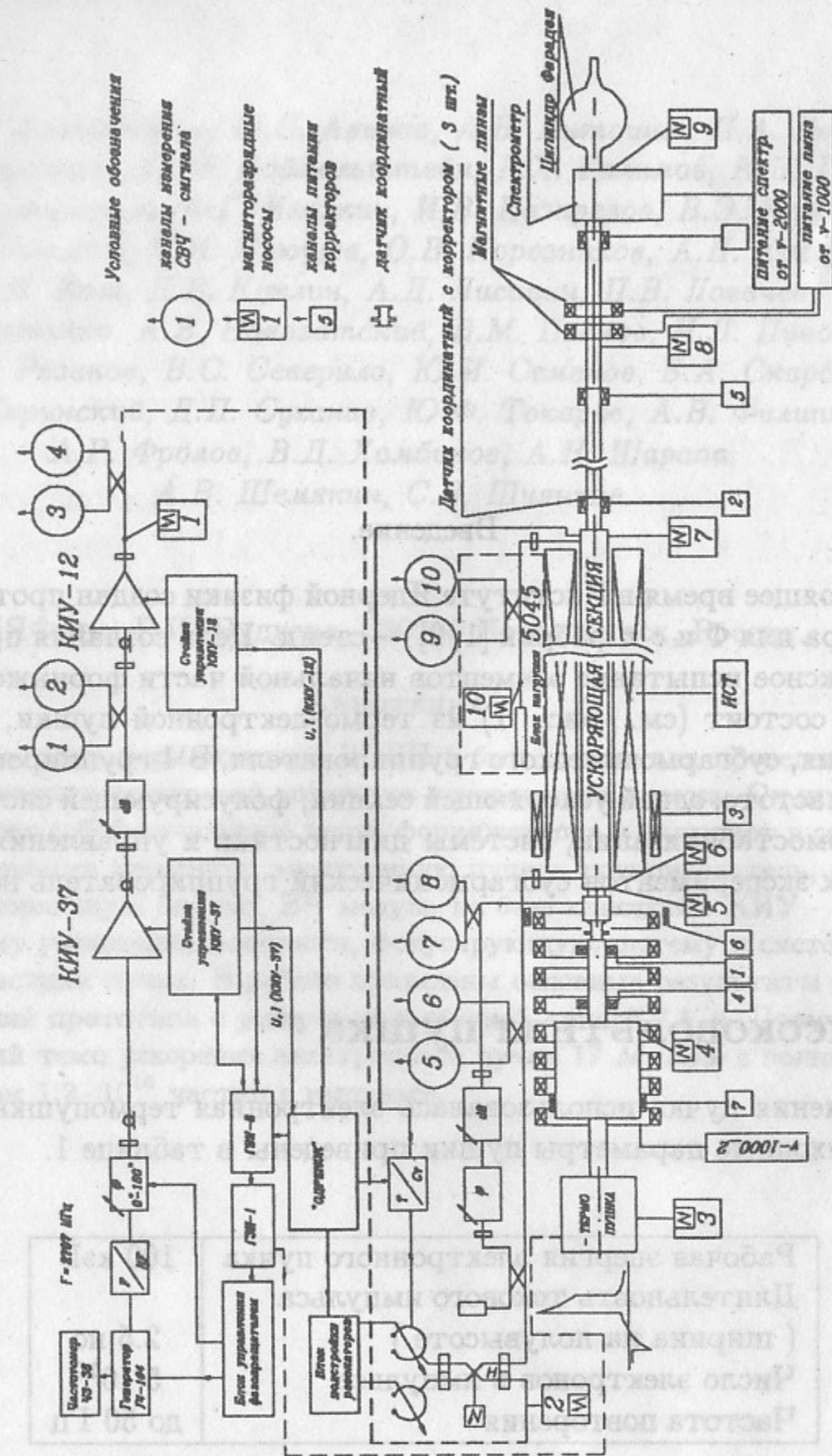


Рис. 1: Принципиальная схема прототипа форинжектора.

## 2 ВЧ-питание стенда

Непрерывный ВЧ-сигнал ( $f \approx 51.8 \text{ МГц}$ ,  $U = 100 \text{ мВ}$ ) с задающего генератора-синтезатора Г4-164 через умножитель частоты поступает на дискретный управляемый  $180^\circ$  фазовращатель. Далее ВЧ-сигнал через предусилитель на базе клистрона КИУ-37 поступает на вход клистрона КИУ-12. С КИУ-12 импульс длительностью  $\sim 2.5 \text{ мкс}$  по вакуумному волноводному тракту ( $72 \times 34 \text{ мм}^2$ ) через умножитель мощности типа SLED подается на вход ускоряющей секции (УС). На выходе УС располагается согласованная нагрузка. Часть мощности после системы SLED через волноводный направленный ответвитель ( $\alpha_{отв} \approx 28 \text{ дБ}$ ) ответвляется для питания ВЧ-группирователя. Амплитуда и фаза ВЧ-импульса, поступающего в группирователь регулировалась с помощью аттенюатора и фазовращателя.

Для контроля ВЧ-сигналов с помощью волноводно-коаксиальных направленных ответвителей измерялись следующие сигналы:

- 1) амплитуда падающей волны после КИУ-37,
- 2) амплитуды падающей и отраженной волн после КИУ-12 (перед системой умножения мощности SLED),
- 3) амплитуды падающей и отраженной волн на входе в группирователь,
- 4) амплитуды падающей и отраженной волн на входе в УС,
- 5) относительная фаза сигналов между УС и группирователем,
- 6) уровень ВЧ-мощности, поступающей в нагрузку.

Система умножения мощности SLED состоит из волноводного щелевого моста и двух высокочастотных цилиндрических резонаторов, работающих на виде колебания  $H_{015}$ . У резонаторов одна из стенок сделана подвижной, что дает возможность перестраивать резонансную частоту умножителя с помощью шаговых двигателей. Предварительно были проведены "холодные" измерения параметров резонаторов (см. табл. 2). Указанные параметры резонаторов были выбраны для получения квазиравномерного распределения ускоряющего поля вдоль УС при подаче на нее ВЧ-импульса после системы SLED.

Зная реальную форму импульса  $V(t)$  после системы умножения мощности SLED (см. рис. 2) можно оценить тепловые нагрузки в системе ВЧ-питания. При импульсной мощности КИУ-12  $P_0 \approx 13.8 \text{ МВт}$ , длительности импульса  $\tau_{kl} \approx 2.5 \text{ мкс}$ , с перевертанием фазы на  $180^\circ$  в момент времени  $t = 0 \text{ мкс}$ , и частоте повторения  $F = 50 \text{ Гц}$ :



Диаметр резонаторов $D$	196 мм
Высота резонаторов $H$	359.7 мм
Рабочая частота $f_0$	2797 МГц
Диапазон перестройки $\Delta f$	$\pm 5$ МГц
Изменение частоты при изменении высоты резонаторов $\Delta f/\Delta H$	2.75 МГц/мм
Собственная добротность $Q_0$	105000
Коэффициент связи с подводным волноводом $\beta$	5.7
Собственное время резонатора $\tau_0 = Q_0/(\pi \cdot f_0)$	11.9 мкс
Нагруженное время резонатора $T_c = \tau_0/(1 + \beta)$	1.78 мкс

Таблица 2: Параметры системы умножения мощности SLED.

Энергия от КИУ-12 за 1 импульс

$$W_{kl} = 34.4 \text{ Дж.}$$

Энергия, поступающая в УС до переворота фазы

$$W_1 = \int_{-\infty}^0 |V(t)|^2 dt = 4.9 \text{ Дж.}$$

Энергия, поступающая в УС после переворота фазы

$$W_2 = \int_0^{\infty} |V(t)|^2 dt = 26.5 \text{ Дж.}$$

ВЧ - Полная энергия, поступающая в УС за все время одного импульса

$$W_{acc} = W_1 + W_2 = 31.4 \text{ Дж.}$$

Потери в резонаторах умножения мощности

$$W_{res} = W_{kl} - W_{acc} = 2.9 \text{ Дж.}$$

Средняя мощность от КИУ-12

$$P_{kl} = W_{kl} \cdot F = 1.72 \text{ кВт.}$$

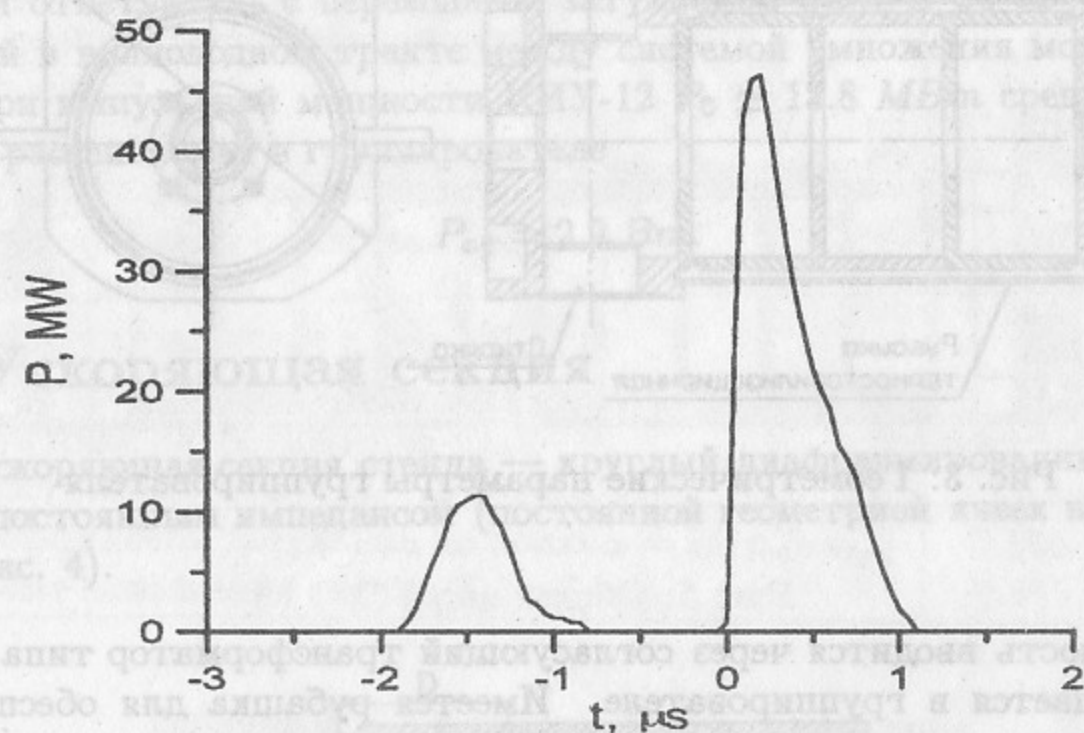


Рис. 2: ВЧ-импульс после системы умножения мощности SLED.

Средняя мощность, поступающая на вход УС

$$P_{acc} = W_{acc} \cdot F = 1.57 \text{ кВт.}$$

Средняя мощность, рассеиваемая в резонаторах SLED

$$P_{res} = W_{res} \cdot F = 0.145 \text{ кВт.}$$

Оценки средних тепловых нагрузок учитывались при определении режимов охлаждения УС, нагрузки и резонаторов SLED.

### 3 ВЧ-группирователь

Конструкция группирователя представлена на рис. 3. Он состоит из четырех связанных цилиндрических резонаторов (3 чашки + 1 трансформатор типа волны). Рабочий вид колебания -  $\theta = -4\pi/3$ .

Группирователь изготовлен из материала с достаточно большим поверхностным сопротивлением — нержавеющей стали марки 12X18H10T. Поэтому группировка происходит в нарастающем электрическом поле.



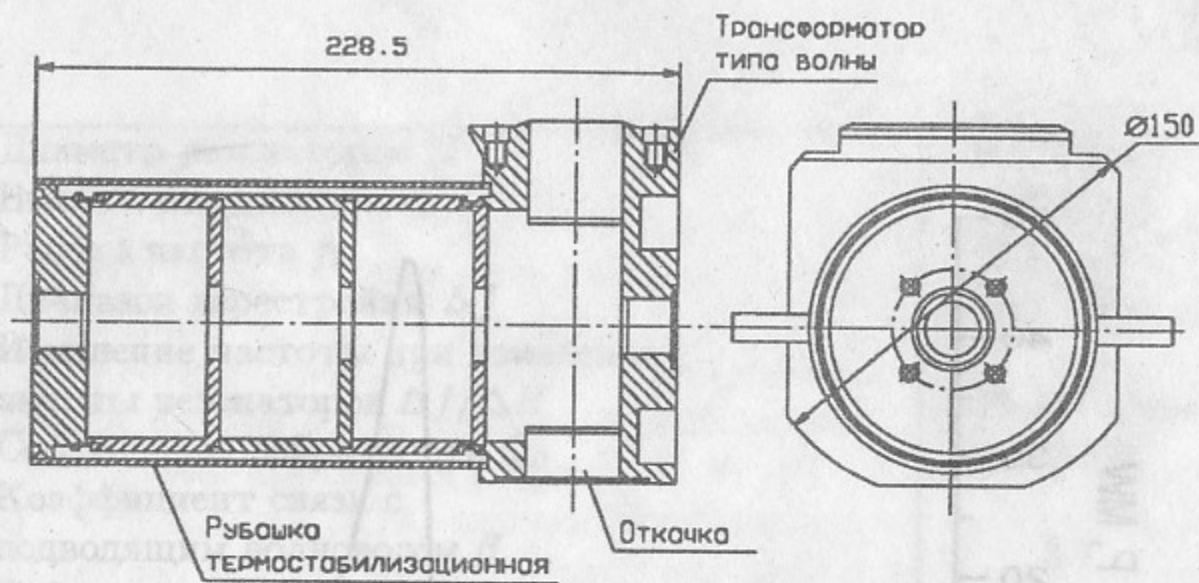


Рис. 3: Геометрические параметры группирователя

ВЧ-мощность вводится через согласующий трансформатор типа волны и поглощается в группирователе. Имеется рубашка для обеспечения охлаждения и термостабилизации. Откачка осуществляется через отверстие, расположенное диаметрально противоположно трансформатору типа волны, что к тому же симметризует распределение электрического поля в первой ячейке. Характеристики группирователя представлены в таблице 3.

Внутренний диаметр ячейки $2b$	84.2 мм
Диаметр пролетного отверстия $2a$	24.3 мм
Толщина диафрагмы $t$	5 мм
Период $D$	39.2 мм
Резонансные частоты:	
$f_1$	2764 МГц
$f_2$	2778 МГц
(рабочая частота) $f_{0g} = f_3$	2797.71 МГц
$f_4$	2811 МГц
Собственная добротность на рабочей частоте $Q_{0g}$	980
Коэффициент связи группирователя с подводимым трактом на рабочей частоте $\beta_g$	1.44

Таблица 3: Параметры ВЧ-группирователя.

Группирователь запитывается от клистрона КИУ-12 через направленный ответвитель с переходным затуханием  $\alpha_{отв} \approx 28$  дБ, расположенный в волноводном тракте между системой умножения мощности и УС. При импульсной мощности КИУ-12  $P_0 \approx 13.8$  МВт средняя мощность, рассеиваемая в группирователе

$$P_{ag} = 2.9 \text{ Вт.}$$

#### 4 Ускоряющая секция

Ускоряющая секция стенда — круглый диафрагмированный волновод с постоянным импедансом (постоянной геометрией ячеек вдоль УС) (см. рис. 4).

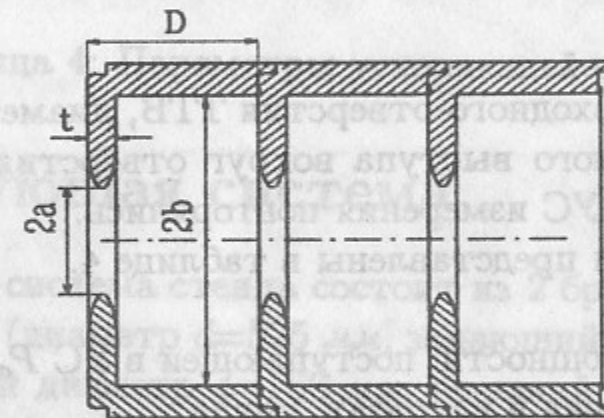


Рис. 4: Геометрия ячеек УС.

Секция состоит из 68 резонаторных ячеек и 2-х трансформаторов типа волны (ТТВ), служащих для преобразования основной моды волноводного тракта  $H_{10}$  в ускоряющую моду секции  $E_{01}$  (см. рис. 5).

В процессе изготовления секции проводились измерения резонансных частот макета, собранного из 2-х регулярных ячеек (одна из которых измеряемая) и 2-х полужеек с установленными в них возбуждающей и приемной антеннами. По результатам измерений осуществлялась отбраковка ячеек УС по частоте и групповой скорости и селективная сборка секции на специальном стенде. После сборки производились измерения отражения ВЧ-сигнала от входа секции и затухания ВЧ-мощности в УС. Секция согласовывалась с волноводным трактом с целью достижения минимального отражения на рабочей частоте. Согласование обеспечивалось настройкой трансформатора типа волны. Настройка производилась



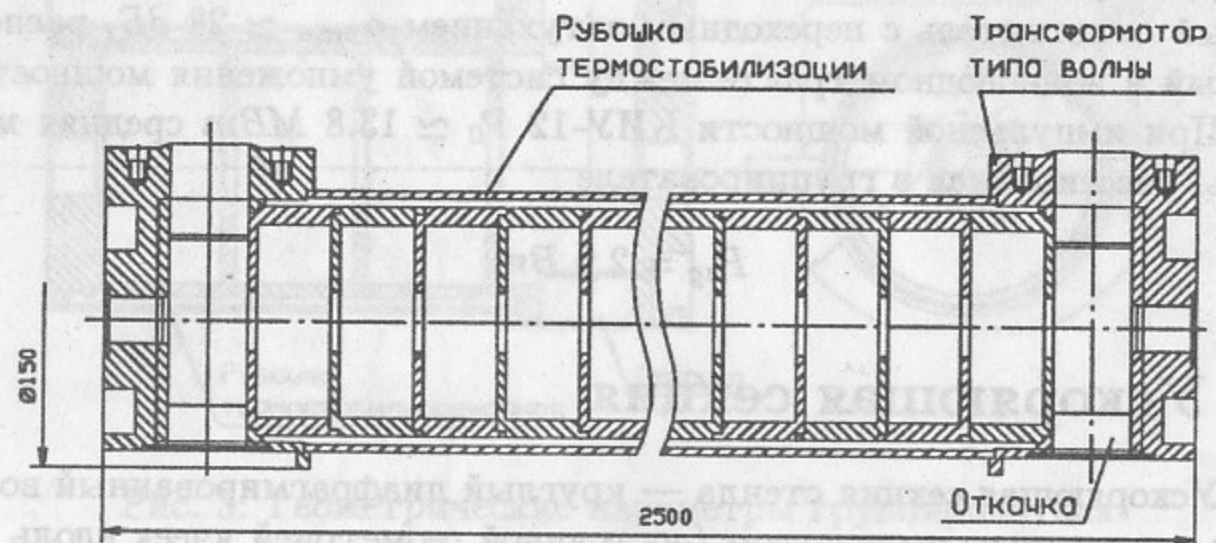


Рис. 5: Общий вид УС.

изменением размера входного отверстия ТТВ, диаметра полости ТТВ и размера кольцеобразного выступа вокруг отверстия вакуумированного канала. После пайки УС измерения повторялись.

Параметры секции представлены в таблице 4.

При средней ВЧ-мощности, поступающей в УС  $P_{acc}=1.57$  кВт, средняя мощность, уходящая в нагрузку, равна

$$P_l = P_{acc} e^{-2\alpha L} = 0.66 \text{ кВт},$$

где  $\alpha$  — коэффициент затухания по полю,  $L$  — длина секции.

Средняя мощность, рассеиваемая в УС

$$P_t = P_{acc} - P_l = 0.91 \text{ кВт}$$

Перед проведением измерений на стенде УС для обезгаживания была прогрета в течение 3-х суток при температуре  $t \approx 170^\circ\text{C}$ . После прогрева и ВЧ-тренировки в УС был получен рабочий вакуум  $\sim 3 \cdot 10^{-8}$  торр.

Контроль и управление температурой УС и резонаторов SLED осуществлялся системой термостабилизации. При этом обеспечивалась стабилизация температуры и расхода охлаждающего дистиллята. Параметры системы термостабилизации приведены в таблице 5.

Внутренний диаметр ячейки $2b$	84.4 мм
Диаметр пролетного отверстия $2a$	24.0 мм
Толщина диафрагмы $t$	4 мм
Период $D$	35.7 мм
Рабочий вид колебаний $\theta$	$2\pi/3$
Относительная фазовая скорость $\beta_\phi$	1
Относительная групповая скорость $\beta_{gr}$	0.019
Длина секции $L$	2.5 м
Полное число ячеек с 2-мя ТТВ $N$	70
Собственная добротность $Q_0$	14307
Шунтовое сопротивление $R_{sh}$	59.3 МОм/м
Собственное время УС $\tau_{oa} = 2Q_0/\omega_0$	1.63 мкс
Коэффициент затухания по полю $\alpha = 1/(\tau_{oa} \cdot v_{gr})$	$0.108 \text{ м}^{-1}$
Время заполнения секции $T_f = L/v_{gr}$	0.441 мкс

Таблица 4: Параметры ускоряющей секции.

## 5 Фокусирующая система

Фокусирующая система стенда состоит из 2 бронированных линз. 6 кольцевых катушек (диаметр  $d=525$  мм, задающий ток  $I$  до 510 А) и соленоида (внутренний диаметр  $d=160$  мм, внешний диаметр  $D=320$  мм, длина  $L=2300$  мм, задающий ток  $I$  до 1100 А). На рис. 6 показано распределение фокусирующего магнитного поля  $B_z$  [Гс] по длине стенда. Для проводки ускоренного пучка до спектрометра и цилиндра Фарадея использовался квадрупольный дублет.

Рабочий расход воды	0.2 - 0.5 л/с
Стабильность расхода	$\pm 10\%$
Рабочий диапазон температуры	25 - 40°C
Рабочая температура	30°C
Точность стабилизации температуры	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
Потребляемая мощность	до 20 кВт

Таблица 5: Параметры системы термостабилизации.



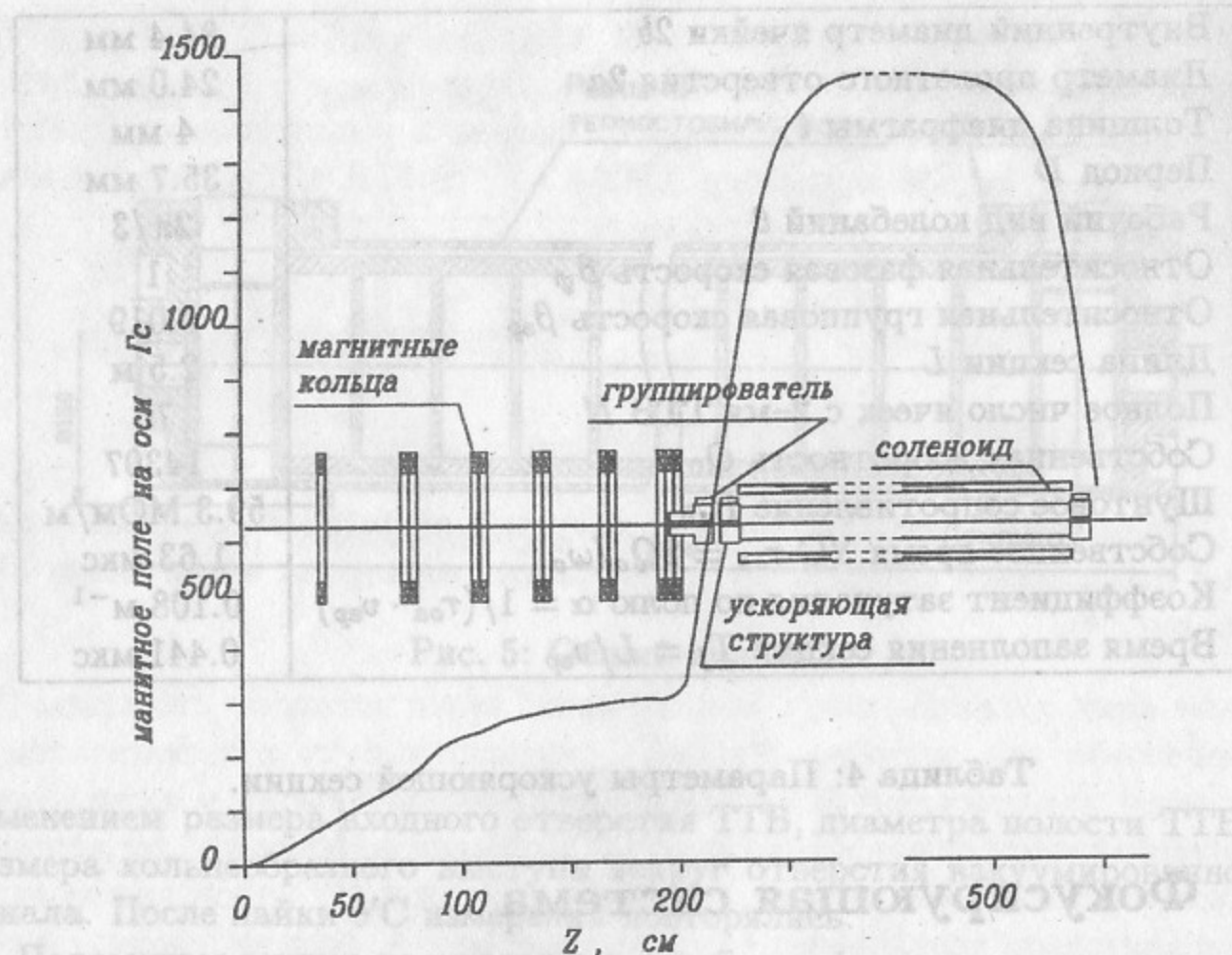


Рис. 6: Распределение фокусирующего магнитного поля.

Кроме основной фокусирующей системы для корректировки траектории пучка использовались магнитные корректоры, расположенные в различных местах ускоряющего тракта (см. рис. 1).

Система управления позволяла оперативно изменять задающие токи как в основной фокусирующей системе, так и в корректорах..

Положение пучка контролировалось полосковыми двухкоординатными датчиками положения пучка, расположенными на выходе термоэлектронной пушки, на входе и выходе УС.

## 6 Система диагностики

Кроме измерения ВЧ-импульсов на стенде измерялись полный заряд пучка с термоэмиссионной пушки, заряд ускоренного пучка, энергетические характеристики ускоренного пучка.

Измерения полного заряда пучка с термоэлектронной пушки осуществлялось резистивным датчиком, установленным перед входом в группирователь (см. рис. 1). Заряд ускоренного пучка после УС измерялся цилиндром Фарадея. Измерения энергетических характеристик пучка проводились при помощи 180° спектрометра, после которого пучок попадал на люминофорный экран. Зная величину магнитного поля в спектрометре  $H$  и диаметр поворота пучка  $D$  можно определить энергию ускоренных электронов  $\mathcal{E} = \frac{eHD}{2}$ , а по размеру и относительной яркости светящегося пятна на люминофоре оценить энергетический разброс в пучке.

Предварительно было измерено соотношение между магнитным полем спектрометра и током в обмотках магнита и снято распределение поля в зазоре между полюсами. После этих измерений энергия пучка определялась по формуле

$$\mathcal{E}[\text{МэВ}] = 8.1 \cdot 10^{-4} \cdot I[\text{А}] \cdot D[\text{см}],$$

где  $I$  — ток в обмотках магнита спектрометра,  $D$  — диаметр поворота пучка.

Полная ошибка в определении энергии пучка, складывающаяся из ошибки определения диаметра поворота пучка и гистерезиса магнитного поля при переключениях магнита спектрометра, равна  $\pm 3\%$ .

## 7 Основные эксперименты и результаты измерений

Временная диаграмма работы стенда изображена на рис. 7.

Запуски ВЧ-сигналов, переворота фазы, пушки синхронизованы друг с другом с точностью  $\sim 100$  пс. Все запуски стенда привязаны к фазе питающей электросети.

Для эффективного использования ускоряющей секции, инжекция пучка (запуск электронной пушки) должен производиться после полного заполнения секции ВЧ-импульсом, т. е. через время  $\tau = L/v_{gr}$  после 180° переворота фазы на системе умножения мощности. Так как время заполнения секции  $T_f \simeq 0.44$  мкс соизмеримо с временами распространения сигналов в контролирующих и управляющих цепях, то время подачи разрешения на запуск электронной пушки определялось экспериментально по максимуму выходной энергии пучка.



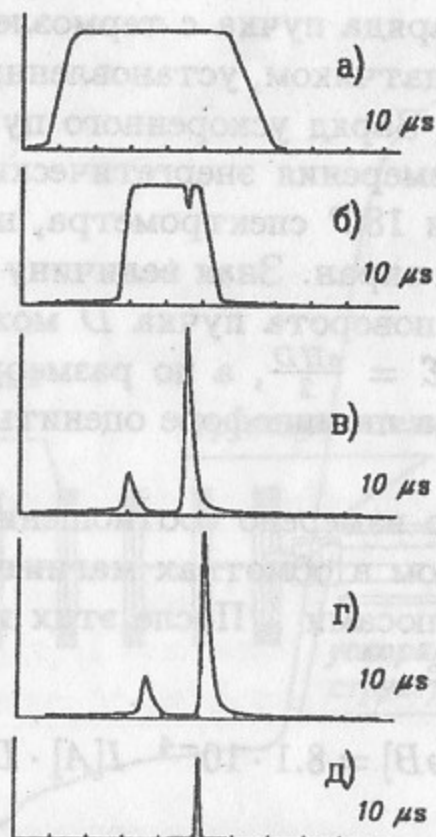


Рис. 7: Временная диаграмма работы стенда : а) ВЧ-импульс с выхода КИУ-37, б) ВЧ-импульс с выхода КИУ-12 (на входе в систему SLED), в) ВЧ-импульс на входе в УС, г) ВЧ-импульс на выходе УС, д) импульс запуска пушки.

Распределение амплитуды ускоряющего электрического поля вдоль УС с постоянным импедансом

$$E(z, t) = E_0 \left( t - \frac{z}{v_{ep}} \right) e^{-\alpha z},$$

где  $E_0(t) = E(0, t)$  — амплитуда электрического поля на входе в УС при  $z=0$ . Так как  $E_0(t) = \sqrt{2\alpha R_{sh} P(t)}$ , то зная зависимость мощности  $P(t)$ , поступающую после системы умножения мощности на вход УС, можно найти распределение  $E(z, t)$  в различных точках УС в разное время.

На рис. 8 изображено распределение амплитуды ускоряющего поля в зависимости от координаты  $z$  вдоль УС в различное время  $t$  после начала заполнения секции, восстановленное по реальному импульсу  $P(t)$  на входе в УС.

Максимальное электрическое поле в начале УС при  $z=0$  и  $t=0$   $E_0 = 24.5$  МВ/м. Рабочее электрическое поле при  $t = T_f$   $E_{acc} = 17.7$  МВ/м.

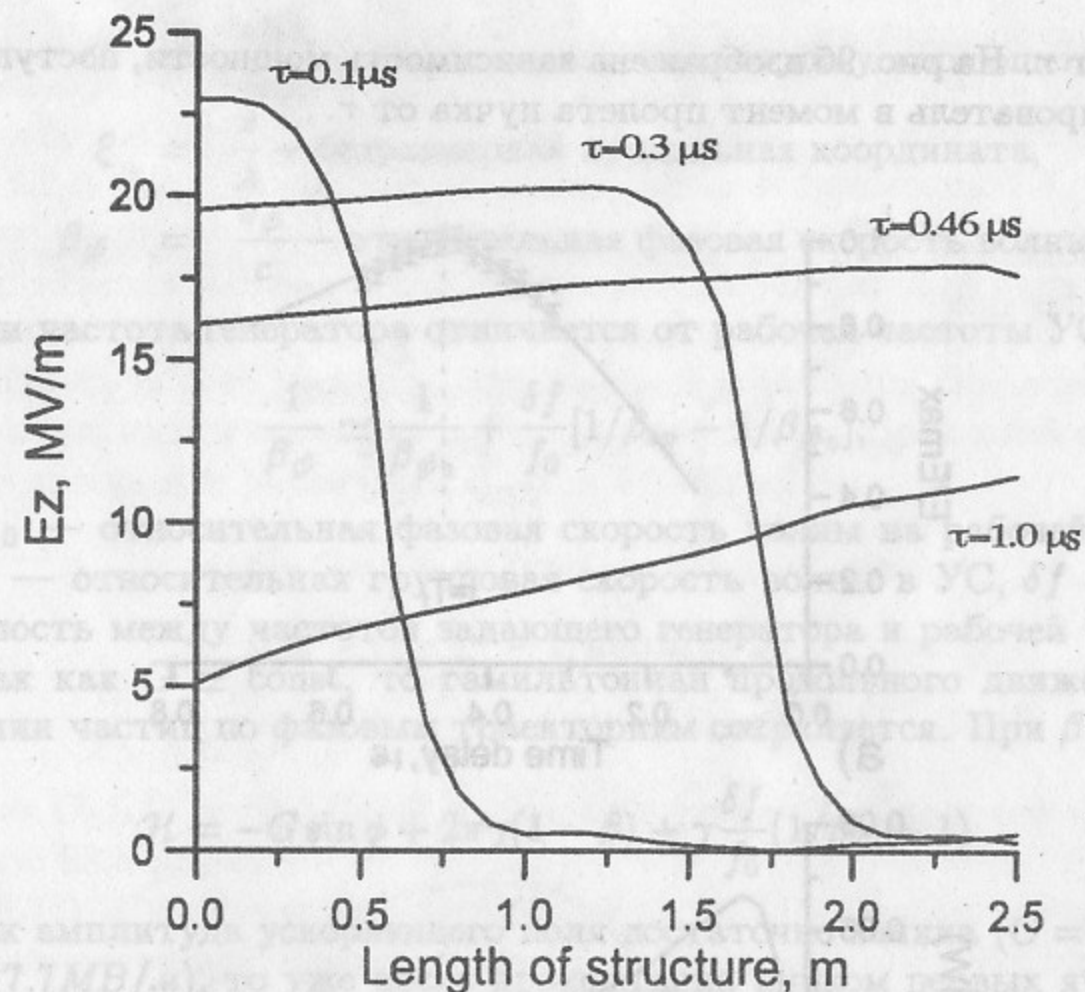


Рис. 8: Распределение электрического поля вдоль УС в различные моменты времени.

Квазиравномерное распределение ускоряющего поля вдоль УС — результат специального выбора параметров умножителя мощности SLED. Полная энергия, набираемая пучком, в зависимости от времени влета в секцию  $\tau$  ( $\tau$  — время задержки импульса тока с электронной пушки относительно времени переворота фазы на  $180^\circ$  в системе SLED) :

$$\mathcal{E}(\tau) = \int_0^L E(z, \tau) dz,$$

На рис. 9а приведен график зависимости  $\mathcal{E}(\tau)/\mathcal{E}_{max}$ . Точки на графике соответствуют экспериментально измеренным при определении оптимального времени задержки импульса тока электронной пушки. Видно хорошее согласие экспериментальных данных с теоретическим предсказанием. Так как группирователь запитывается через направленный ответвитель, установленный непосредственно перед входом в УС, то ВЧ-мощность, поступающая в него в момент пролета пучка также будет за-



висеть от  $\tau$ . На рис. 9б изображена зависимость мощности, поступающей в группирователь в момент пролета пучка от  $\tau$ .

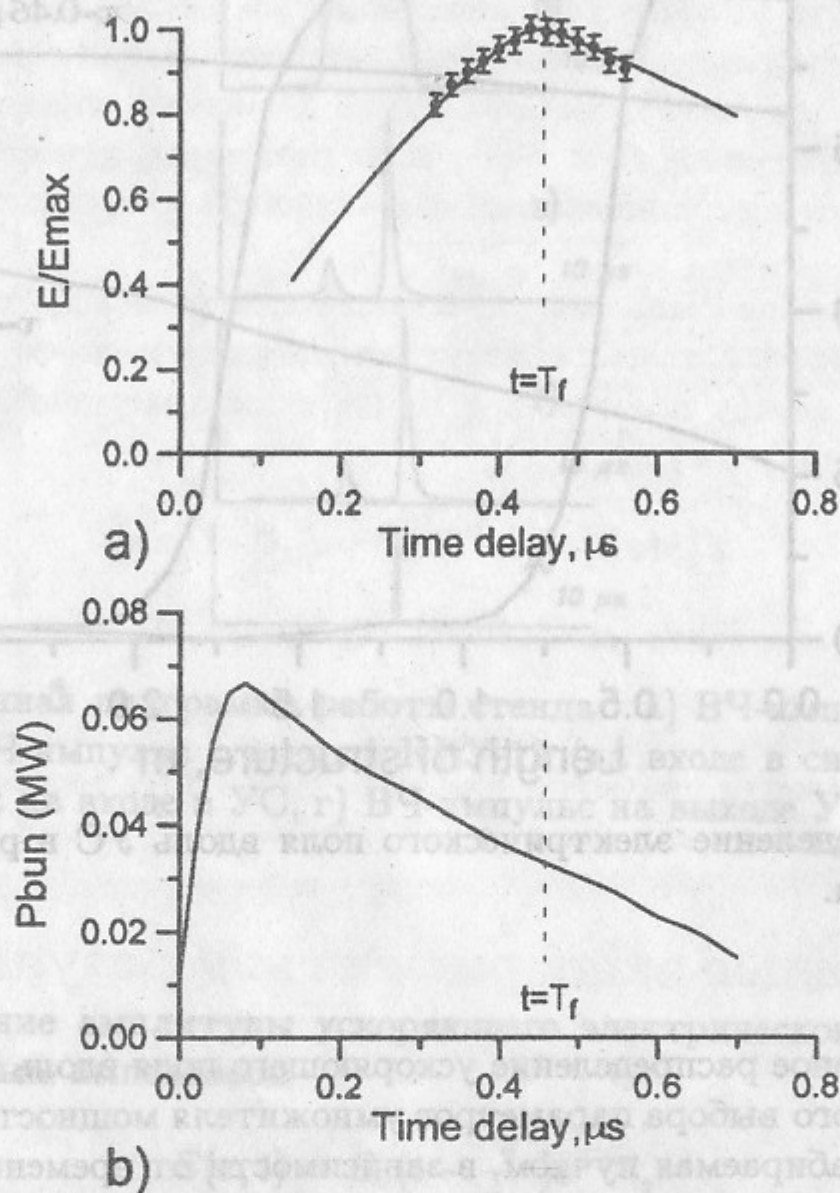


Рис. 9: а) Зависимость энергии пучка от времени задержки (сплошная линия — теоретический расчет), б) зависимость мощности поступающей в группирователь в момент пролета пучка от времени задержки.

Ускорение пучка происходит в квазипостоянном вдоль УС ускоряющем поле. Поэтому основные энергетические зависимости можно получить в аналитическом виде. Уравнения для продольного движения

$$\frac{d\gamma}{d\xi} = G \cos \phi, \quad (7.1)$$

$$\frac{d\phi}{d\xi} = 2\pi \left( \frac{1}{\beta_\phi} - \frac{1}{\beta} \right), \quad (7.2)$$

где  $G = \frac{eE\lambda}{mc^2}$  — безразмерная амплитуда ускоряющего поля,  
 $\xi = \frac{z}{\lambda}$  — безразмерная продольная координата,  
 $\beta_\phi = \frac{v_\phi}{c}$  — относительная фазовая скорость волны.

Если частота генератора отличается от рабочей частоты УС, то

$$\frac{1}{\beta_\phi} \approx \frac{1}{\beta_{\phi_0}} + \frac{\delta f}{f_0} [1/\beta_{ep} - 1/\beta_{\phi_0}], \quad (7.3)$$

где  $\beta_{\phi_0}$  — относительная фазовая скорость волны на рабочей частоте  $f_0$ ,  $\beta_{ep}$  — относительная групповая скорость волны в УС,  $\delta f = f - f_0$  — разность между частотой задающего генератора и рабочей частотой УС. Так как  $G \approx \text{const}$ , то гамильтониан продольного движения при движении частиц по фазовым траекториям сохраняется. При  $\beta_{\phi_0} = 1$

$$\mathcal{H} = -G \sin \phi + 2\pi\gamma(1 - \beta) + \gamma \frac{\delta f}{f_0} (1/\beta_{ep} - 1). \quad (7.4)$$

Так как амплитуда ускоряющего поля достаточно велика ( $G = 3.71$  при  $E_0 = 17.7 \text{ MB/м}$ ), то уже после прохождения пучком первых ячеек вторым слагаемым в гамильтониане можно пренебречь: при  $\gamma \rightarrow \infty$

$$\gamma(1 - \beta) \sim \frac{1}{2\gamma} \rightarrow 0.$$

Тогда можно считать, что основное время ускоряемые частицы находятся на фазовых траекториях, определяемых уравнением:

$$\sin \phi \approx \sin \phi_i - \frac{2\pi}{G} \gamma_i (1 - \beta_i) + \delta \frac{\gamma - \gamma_i}{\gamma_0 - \gamma_i}, \quad (7.5)$$

где  $\delta = \frac{2\pi L}{\lambda_0} (1/\beta_{ep} - 1) \frac{\delta f}{f_0}$ ,  $L$  — длина УС,  $\lambda_0$  — рабочая длина волны,  $\gamma_i$  и  $\phi_i$  — относительная энергия и фаза инжектируемых частиц,  $\gamma_0 - \gamma_i = \frac{GL}{\lambda_0}$  — максимальная кинетическая энергия, набираемая в УС при  $f = f_0$ .

Из уравнения 7.1 получаем

$$\int_{\gamma_i}^{\gamma} \frac{d\gamma}{\cos \phi(\gamma)} = \frac{GL}{\lambda_0} = \gamma_0 - \gamma_i = \mathcal{E}_0. \quad (7.6)$$

После подстановки  $\phi(\gamma)$  из 7.5 и интегрирования получим

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \frac{\sin \frac{\delta}{2}}{\frac{\delta}{2}} \cos \left( \frac{\delta}{2} + \phi_0 \right), \quad (7.7)$$



где  $\phi_0$  определяется из выражения

$$\sin \phi_0 = \sin \phi_i - \frac{2\pi}{G} \gamma_i (1 - \beta_i).$$

Можно показать, что при заданных  $G$ ,  $\gamma_i$  и  $\delta$  максимум энергии  $\mathcal{E}_{max}$  достигается при

$$\phi_0 = \begin{cases} \phi_x & \text{при } -\frac{\pi}{2} < \delta < -2\phi_x, \\ -\frac{\delta}{2} & \text{при } -2\phi_x < \delta < \pi, \\ -\frac{\pi}{2} & \text{при } \pi < \delta, \end{cases}$$

где  $\phi_x = \arcsin \left[ 1 - \frac{2\pi}{G} \gamma_i (1 - \beta_i) \right].$

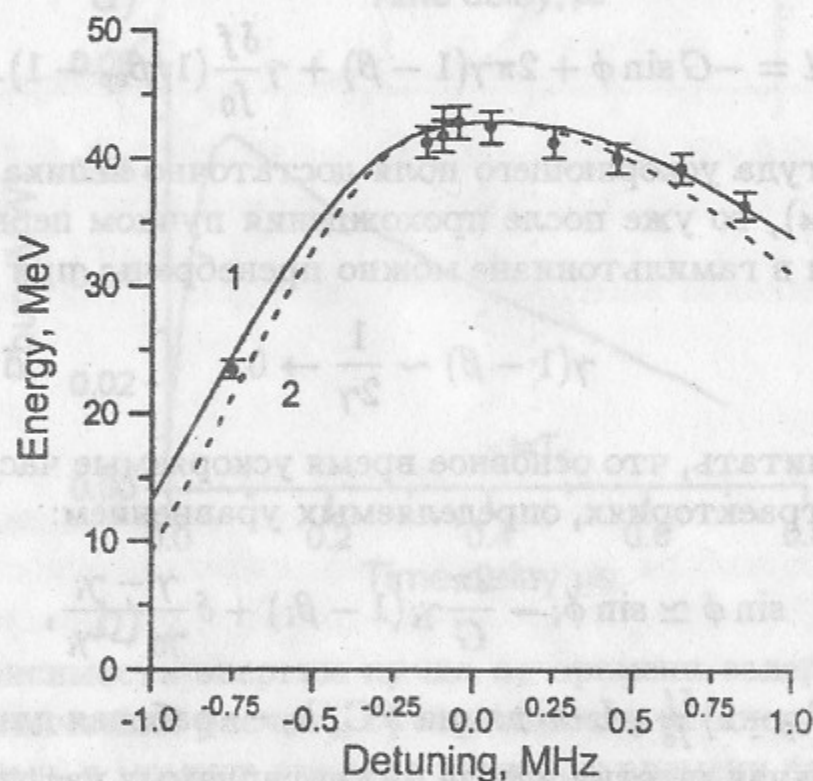


Рис. 10: Зависимость набираемой пучком энергии от расстройки частоты. 1 — точное численное решение уравнений движения, 2 — аналитическая зависимость, точки — экспериментальные данные.

На рис. 10 показана максимальная энергия, набираемая частицами в УС в зависимости от величины расстройки  $\delta f = f - f_0$  при  $G=3.71$  и

$\gamma_i = 1.2$  (энергия инжекции 100 кэВ). Точки на рисунке соответствуют экспериментально измеренным энергиям электронного пучка при определении рабочей частоты УС. Кривая 1 — точное решение системы уравнений 7.1 и 7.2, кривая 2 — аналитическая зависимость 7.7. Нулевое значение расстройки соответствует частоте  $f_0 \approx 2798.3$  МГц, при которой достигается максимум выходной энергии ускоренного пучка.

Так как  $G \sim E \sim \sqrt{P}$ , где  $P$  — мощность на входе в УС в момент ускорения пучка, то можно, в тех же предположениях сильного ускоряющего поля, найти аналитическую зависимость максимальной выходной энергии пучка для различных  $P$ . При  $\delta f = 0$  имеем

$$\mathcal{H} = -G \sin \phi_i + 2\pi \gamma_i (1 - \beta_i) \approx -G \sin \phi.$$

Тогда

$$\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0} = \frac{G}{G_0} \cos \phi = \frac{G}{G_0} \cos \left\{ \arcsin \left[ \phi_i - \frac{2\pi}{G} \gamma_i (1 - \beta_i) \right] \right\},$$

где  $\mathcal{E}_0 = G_0 L / \lambda = 44.3$  МэВ — энергия частиц при входной мощности  $P = P_0 = 28.5$  МВт

( $G_0 = 3.71$ ). Для частиц с гамильтонианом  $\mathcal{H} > 0$  максимальную энергию набирают частицы с начальной фазой инжекции  $\phi_i = \frac{\pi}{2}$ . То есть

$$\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0} = \frac{G}{G_0} \sqrt{1 - \left[ 1 - \frac{2\pi}{G} \gamma_i (1 - \beta_i) \right]^2} = \sqrt{\sqrt{p_x} (2\sqrt{p} - \sqrt{p_x})}, \text{ при } p < p_x, \quad (7.8)$$

где  $p = P/P_0,$

$$p_x = \frac{2\pi}{G_0} \gamma_i (1 - \beta_i) = 0.91.$$

При  $\mathcal{H} \leq 0$  максимальную энергию набирают частицы, имеющие конечную фазу  $\phi = 0$ . Тогда

$$\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_0} = \sqrt{p}, \text{ при } p > p_x.$$

На рис. 11 показана зависимость относительной максимальной энергии пучка  $\mathcal{E}/\mathcal{E}_0$  на выходе УС при различных значениях входной мощности  $p = P/P_0$  на рабочей частоте УС  $f = f_0$ . Точки соответствуют измеренным значениям максимальной энергии выходного пучка. Кривая 1 — точное решение системы уравнений 7.1 и 7.2, кривая 2 — аналитическая зависимость 7.8 для различных  $G/G_0 = \sqrt{P/P_0}$ .



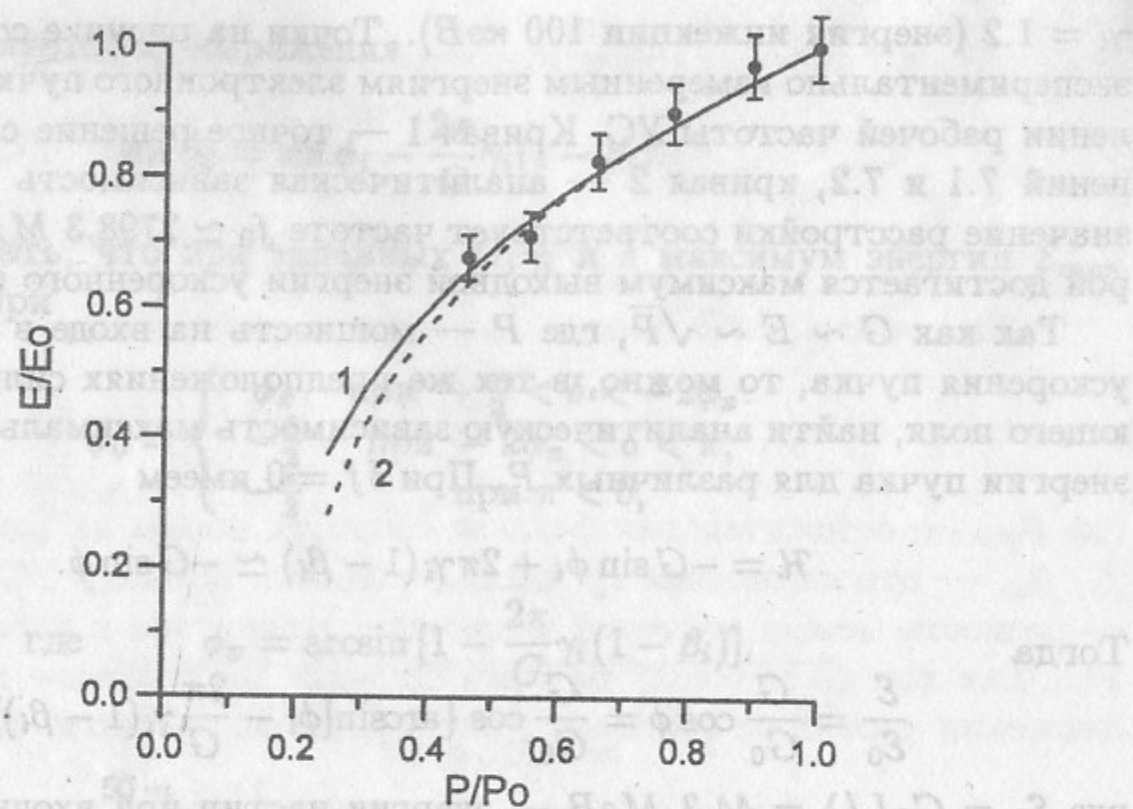


Рис. 11: Зависимость относительной выходной энергии пучка от входной мощности. 1 — точное численное решение уравнений движения, 2 — аналитическая зависимость, точки — экспериментальные данные.

На входе в УС установлен ВЧ-группирователь. Для выбора оптимального сдвига фазы  $\phi$  между группирователем и УС снималась зависимость тока ускоренных частиц от разности фаз  $\phi$ . На рис. 12 показана зависимость  $I(\phi)$ , снятая на рабочей частоте УС. В результате измерений был установлен оптимальный сдвиг фаз между группирователем и УС, при котором достигается максимум ускоряемого тока.

На рис. 13 представлены зависимости энергии ускоренного пучка и энергетического разброса в пучке от разности фаз между группирователем и УС.

Видно, что минимальный энергетический разброс в пучке достигается также вблизи выбранного нуля, а энергия пучка довольно слабо зависит от сдвига фаз между группирователем и УС.

Кроме того, для проверки эффективности работы группирователя была снята зависимость тока ускоренных частиц от мощности ВЧ, поступающей в группирователь  $I(P_{гр})$ , при постоянной мощности ВЧ на входе в УС. Соответствующие зависимости изображены на рис. 14. Из рисунка следует довольно сильная зависимость тока пучка от напряженности поля в группирователе, что подтверждает эффективность группировки.

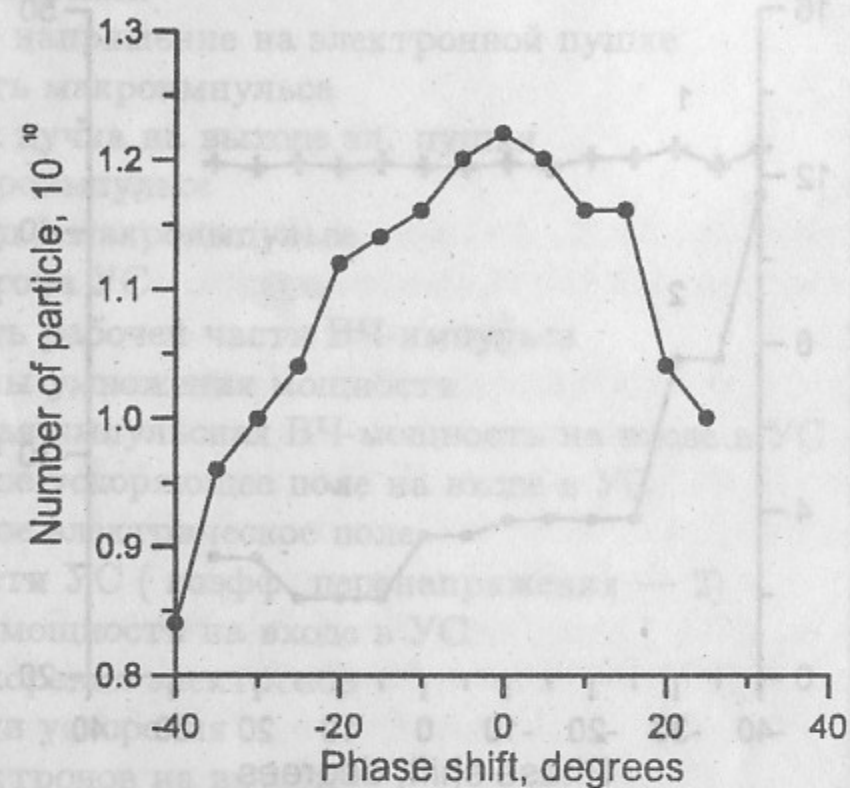


Рис. 12: Зависимость тока ускоренного пучка от разности фаз между группирователем и УС (экспериментальные данные).

Эксперименты на стенде были начаты в октябре 1996 года. Важнейшие достигнутые к настоящему времени параметры прототипа представлены в сводной таблице 6.

В настоящее время на стенде проводятся работы по запуску субгармонического группирователя, работающего на 16-й субгармонике рабочей частоты (174.8 МГц). Это позволит проверить работу начальной части форинжектора в одногустковом режиме.



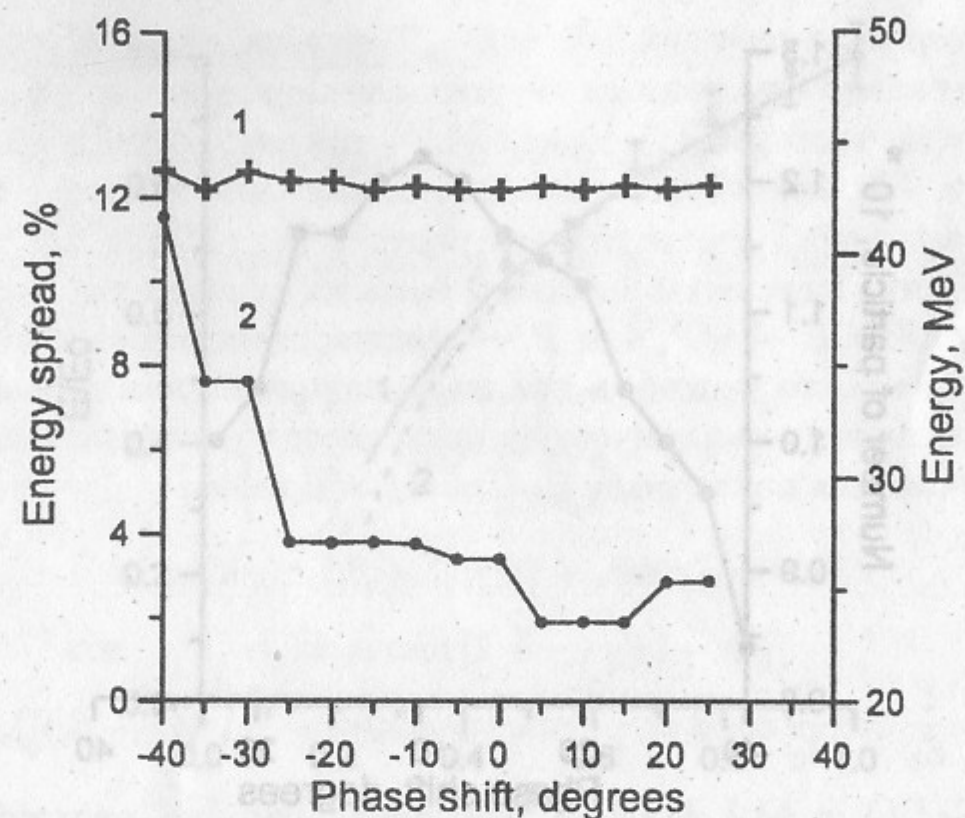


Рис. 13: Зависимость энергии ускоренного пучка (кривая 1) и энергетического разброса (кривая 2) от разности фаз между группирователем и УС.

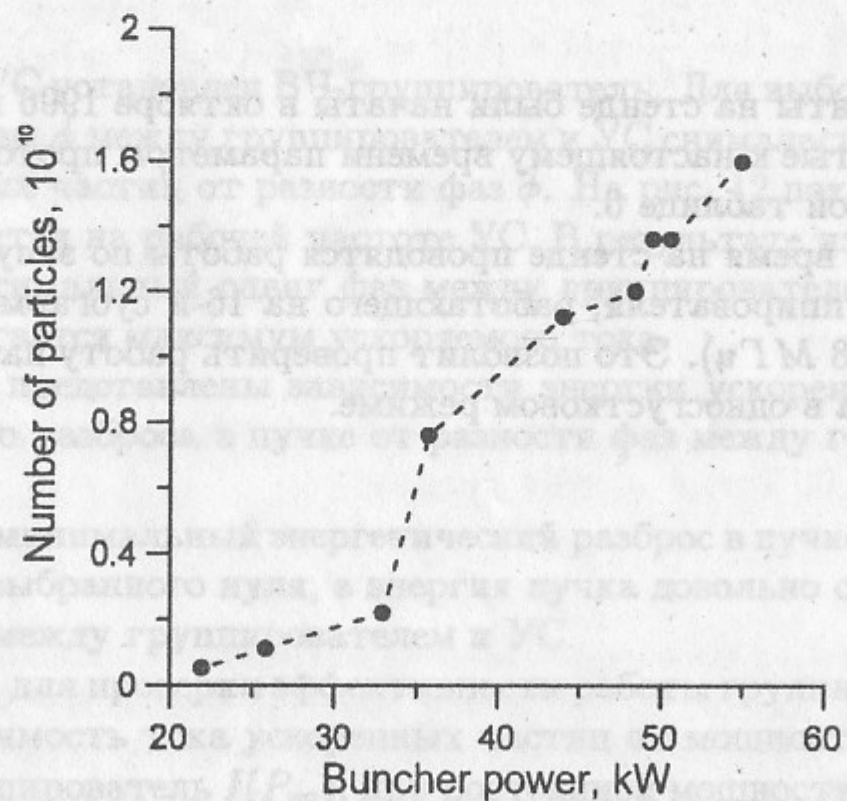


Рис. 14: Зависимость тока ускоренных частиц от мощности ВЧ, поступающей в группирователь.

Частота повторений	50 Гц
Ускоряющее напряжение на электронной пушке	100 кВ
Длительность макроимпульса	2.5 нс
Средний ток пучка на выходе эл. пушки	2 А
Заряд в макроимпульсе	8 нКл
Число частиц в макроимпульсе	$5 \cdot 10^{10}$
Рабочая частота УС	2798.3 МГц
Длительность рабочей части ВЧ-импульса после системы умножения мощности	0.45 мкс
Максимальная импульсная ВЧ-мощность на входе в УС	46.4 МВт
Максимальное ускоряющее поле на входе в УС	24.5 МВ/м
Максимальное электрическое поле на поверхности УС (коэфф. перенапряжения — 2)	49 МВ/м
Импульсная мощность на входе в УС в момент ускорения электронов	28.5 МВт
Средний темп ускорения	17.7 МэВ/м
Энергия электронов на выходе	44.3 МэВ
Число ускоренных частиц на выходе	$1.2 \cdot 10^{10}$
Минимальный энергетический разброс в пучке	$\pm 1\%$

Таблица 6: Параметры стенда.

## Литература

- [1] A.V. Alexandrov et al., "Preinjector for electron-positron factories". Proc. 1994 XIV Conf. on Charge Part. Acc., Protvino, Russia.
- [2] A.V. Alexandrov et al., "Electron-positron preinjector of VEPP-5 complex". Proc. 1996 of the XVIII Int. Linear Acc. Geneva, Switzerland. pp. 821-823.
- [3] Отчет о научно-исследовательской работе (договор N 92-4) "Линейный ускоритель электронов для интенсивного источника резонансных нейтронов (ИРЕН)", Новосибирск, 1993, с.6-16.



А.В. Александров, М.С. Авилов, А.В. Антошин, П.А. Бак,  
О.Ю. Баженов, Ю.М. Боймельштейн, Р.Х. Галимов,  
К.В. Губин,  
Н.С. Диканский, А.Г. Иголкин, И.В. Казарезов, В.Э. Карлин,  
Н.А. Киселева, С.Н. Ключев, О.В. Корозников, А.Н. Косарев,  
Н.Х. Кот, Д.Е. Куклин, А.Д. Лисицин, П.В. Логачев,  
Л.А. Мироненко, А.В. Новохатский, В.М. Павлов,  
И.Л. Пивоваров,  
А.М. Резаков, В.С. Северило, Ю.И. Семенов, Б.А. Скарбо,  
А.Н. Скринский, Д.П. Суханов, Ю.Ф. Токарев, А.В. Филиппов,  
А.Р. Фролов, В.Д. Хамбиков, А.Н. Шарапа.  
А.В. Шемякин, С.В. Шиянков.

Испытание прототипа форинжектора ВЭПП-5

ИЯФ 97-64

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 21.07.1997 г.

---

Сдано в набор 21.07.1997 г.

Подписано в печать 21.07.1997 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.7 печ.л., 1.4 уч.-изд.л.

Тираж 170 экз. Бесплатно. Заказ N 64.

---

Обработано на IBM PC и отпечатано на  
ротапинтере ГНЦ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.