

Сибирское отделение Российской Академии наук
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

М.С. Авилов, В.Е. Акимов, А.В. Александров, А.В. Антошин,
П.А. Бак, О.Ю. Баженов, Ю.М. Боймшельштейн, Д.Ю. Болховитянов,
Р.Х. Галимов, Р.Г. Громов, К.В. Губин, С.М. Гуров, Е.А. Гусев,
Н.С. Диканский, Н.И. Зиневич, И.В. Казарезов, Н.А. Киселева,
В.И. Кокоулин, В.И. Копылов, С.Н. Ключев, М.Б. Корабельников,
А.А. Корепанов, А.Н. Косарев, Н.Х. Кот, Н.Н. Лебедев, П.В. Логачев,
А.Н. Лукин, П.В. Мартышкин, Л.А. Мироненко, А.А. Никифоров,
А.В. Новохатский, В.М. Павлов, И.Л. Пивоваров, О.В. Пирогов,
В.В. Подлевских, С.Л. Самойлов, Б.А. Скарбо, Б.М. Смирнов,
А.Н. Скринский, А.Н. Сударкин, Д.П. Суханов, А.Р. Фролов,
А.С. Цыганов, А.Г. Чупыра, В.Д. Хамбиков, В.Д. Шемелин,
С.В. Шиянков, Ю.В. Юдин.

ИСПЫТАНИЕ УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ
ФОРИНЖЕКТОРА ВЭПП-5

ИЯФ 2000-26

Новосибирск
2000

ИСПЫТАНИЕ УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ ФОРИНЖЕКТОРА ВЭПП-5

*М.С. Авилов, В.Е. Акимов, А.В. Александров, А.В. Антошин,
П.А. Бак, О.Ю. Баженков, Ю.М. Боймелитейн, Д.Ю. Болжовитянов,
Р.Х. Галимов, Р.Г. Громов, К.В. Губин, С.М. Гуров, Е.А. Гусев,
Н.С. Диканский, Н.И. Зиневич, И.В. Казарезов, Н.А. Киселева,
В.И. Кокоулин, В.И. Копылов, С.Н. Ключев, М.Б. Корабельников,
А.А. Корепанов, А.Н. Косарев, Н.Х. Кот, Н.Н. Лебедев, П.В. Логачев,
А.Н. Лукин, П.В. Мартышкин, Л.А. Мироненко, А.А. Никифоров,
А.В. Новохатский, В.М. Павлов, И.Л. Пивоваров, О.В. Пирогов,
В.В. Подлевских, С.Л. Самойлов, Б.А. Скарбо, Б.М. Смирнов,
А.Н. Скринский, А.Н. Сударкин, Д.П. Суханов, А.Р. Фролов,
А.С. Цыганов, А.Г. Чупыра, В.Д. Хамбиков, В.Д. Шемелин,
С.В. Шиянков, Ю.В. Юдин.*

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера СО РАН

Аннотация

В работе приведены основные результаты испытаний ускоряющей секции форинжектора ВЭПП-5. Ускоряющая секция длиной 3 м запитывалась ВЧ мощностью 240 МВт от клистрона 5045 с использованием системы умножения мощности типа SLED.

На 180° магнитном спектрометре была зарегистрирована максимальная энергия ускоренного пучка 105 МэВ. При работе с импульсом тока длительностью 310 нс было получено энергосодержание пучка 26 Дж при выходной энергии 92 МэВ.

Test of accelerating Section VEPP 5 Preinjector

M. S. Avilov et al.

Abstract

Basic results of VEPP 5 preinjector accelerating section tests are presented in this paper. Single 3 m long accelerating section was fed by 240 MW RF power of 5045 klystron with pulse compression system.

The maximum beam energy of 105 MeV was detected at U turn magnetic spectrometer. The beam energy per pulse 26 J was reached at the energy level of 92 MeV for the 310 ns beam current.

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Россия

Введение

Ускоряющий тракт форинжектора ВЭПП-5 состоит из двух линейных ускорителей на энергию 300 МэВ и 510 МэВ и включает в себя 14 ускоряющих секций (УС) [1, 2]. Первые ускоряющие секции обоих линаков имеют повышенный средний темп ускорения 25-30 МэВ/м, а остальные - по 17-20 МэВ/м. Целью настоящих испытаний являлась экспериментальная проверка работы УС с максимально возможным темпом ускорения при различных нагрузках током.

Испытания проводились на базе начальной части форинжектора (первый ускорительный модуль), который включает в себя электронную пушку, субгармонический группирователь, ВЧ группирователь, три УС, ВЧ модуль на базе клистрона 5045, систему умножения мощности, фокусирующую систему и систему диагностики пучка. Для получения максимального темпа ускорения вся ВЧ мощность после умножителя мощности подавалась только на первую ускоряющую секцию. Остальные две ускоряющие секции и субгармонический группирователь в данных экспериментах не запитывались и использовались как канал для транспортировки пучка. Этим вариантом работы ускоряющей секции, кроме того, моделировалась работа ускорителя электронов для интенсивного источника резонансных нейтронов – ИРЕН, который изготавливается ИЯФ по договору с ОИЯИ (г. Дубна) [3].

Ускоряющая секция

Ускоряющая секция форинжектора ВЭПП-5 представляет собой отрезок круглого диафрагмированного волновода с постоянным импедансом

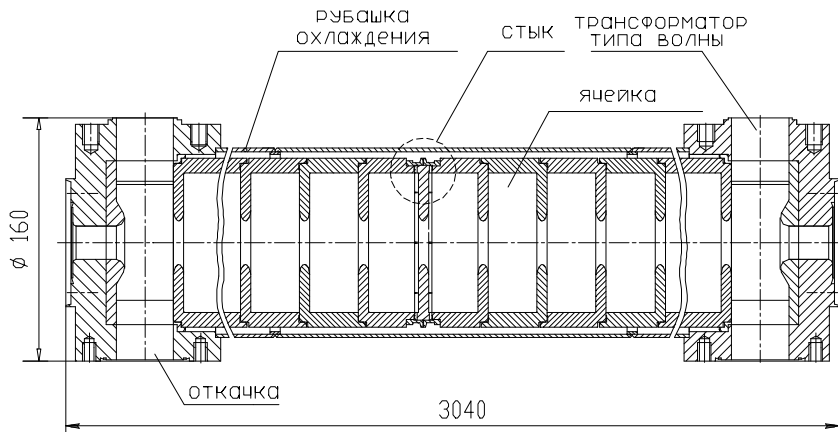


Рис. 1. Общий вид ускоряющей секции.

(постоянной геометрией ячеек вдоль УС) с двумя трансформаторами типа волны (ТТВ). ТТВ преобразуют основную моду волноводного тракта H_{10} в ускоряющую моду E_{01} круглого диафрагмированного волновода. Для уменьшения коэффициента перенапряженности скругление краев диафрагмы выполнялось в виде эллипса с соотношением полуосей 1: 2 (см. рис. 2).

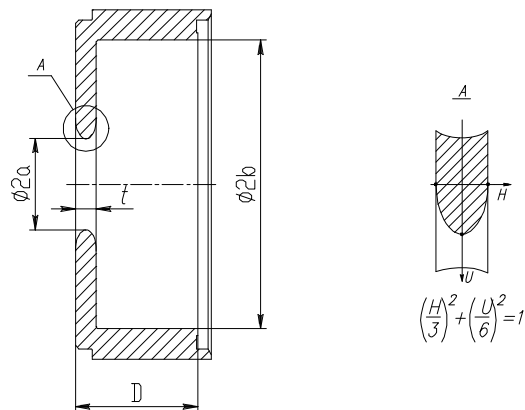


Рис. 2 Геометрия ячеек УС.

В процессе изготовления УС 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 осуществлялись отбраковка ячеек УС по частоте и групповой скорости и селективная сборка 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 изменением размера входного отверстия ТТВ, диаметра полости ТТВ и размера кольцеобразного выступа вокруг отверстия вакуумного канала. Секция собиралась из двух одинаковых частей длиной 1.5 м. Пайка каждой части осуществлялась в вакуумной печи. После пайки УС измерения повторялись. Обе половины спаянных частей секции сваривались вместе через соединительную диафрагму как показано на рис. 3.

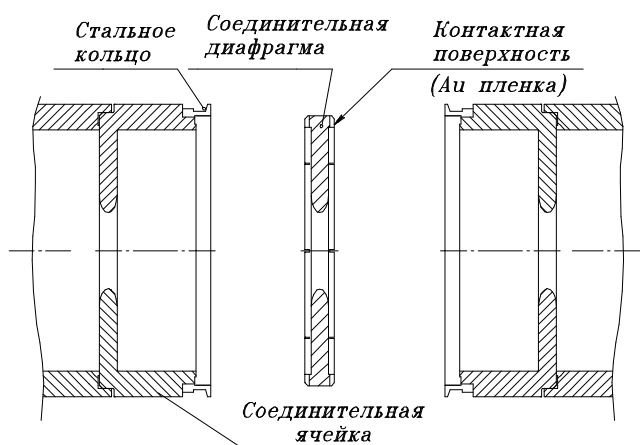


Рис. 3. Соединение двух частей УС.

Соединительная диафрагма покрывалась с двух сторон пленкой из золота и стягивалась между специальными соединительными ячейками до образования термодиффузионного шва. Затем для обеспечения механической прочности проводилась сварка стальных колец (см. рис. 3). Параметры ускоряющей секции представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры ускоряющей секции.

Рабочая частота	2855.5 МГц
Внутренний диаметр ячейки $2b$	83.75 мм
Диаметр пролетного отверстия $2a$	25.9 мм
Толщина диафрагмы t	6 мм
Период D	34.99 мм
Рабочий вид колебаний θ	$2\pi/3$
Относительная фазовая скорость β_ϕ	1
Относительная групповая скорость β_{gp}	0.021
Длина секции L	2.93 м
Полное число ячеек с 2-мя ТТВ	85
Собственная добротность Q_0	13200
Шунтовое сопротивление R_{sh}	51 МОм/м
Собственное время УС $\tau_{0a}=2Q_0/\omega_0$	1.471 мкс
Коэффициент затухания по полю $\alpha=1/(\tau_{0a}v_{gr})$	0.108 м^{-1}
Время заполнения секции $T_f=L/v_{gr}$	0.465 мкс

Перед проведением экспериментов УС и весь волноводный тракт с множителем мощности для обезгаживания были прогреты в течение 3-х суток при температуре $t \approx 230^\circ\text{C}$. После прогрева и ВЧ тренировки в УС был получен рабочий вакуум $\sim 3 \cdot 10^8$ торр.

Схема испытания ускоряющей секции показана на рис. 4.

ВЧ питание модуля

Непрерывный ВЧ сигнал ($f = 1428$ МГц, $P \approx 10$ мВт) с задающего генератора-синтезатора через управляемый 90° фазовый переключатель поступает на блок усилителя-формирователя У2856-2. Усилитель-формирователь работает на удвоенной частоте 2856 МГц и формирует импульс ВЧ длительностью ~ 3.5 мкс и выходной импульсной мощностью $P \approx 200\div 400$ Вт для возбуждения клистрона 5045. Фазовый переключатель обеспечивает переключение фазы ВЧ колебаний клистрона на 180° на рабочей частоте в заданное время для обеспечения работы системы умножения мощности. С клистрона импульс ВЧ мощностью до 60 МВт по вакуумному волноводному тракту ($72 \times 34 \text{ мм}^2$) через умножитель мощности типа SLED подается на вход ускоряющей секции. Неиспользованная в УС мощность поглощается в согласованной нагрузке,

расположенной на ее выходе. Часть мощности после системы SLED через волноводный направленный ответвитель с переходным ослаблением $\alpha_{отв} = 23$ дБ подается в ВЧ группирователь. Амплитуда и фаза ВЧ импульса, поступающего в группирователь, может регулироваться с помощью аттенюатора и фазовращателя.

Для контроля работы системы ВЧ питания ускоряющего модуля с помощью волноводно-коаксиальных направленных ответвителей измерялись следующие ВЧ сигналы:

- амплитуда падающей волны на входе клистрона 5045;
- амплитуды падающей и отраженной волн после клистрона (перед системой умножения мощности);
- амплитуды падающей и отраженной волн на входе в группирователь;
- амплитуды падающей и отраженной волн на входе в УС;
- относительная фаза сигналов между ВЧ группирователем и УС;
- уровень падающей и отраженной мощности, поступающей в нагрузку.

Система умножения мощности SLED (см. рис. 5) состоит из волноводного щелевого моста и двух высокочастотных цилиндрических резонаторов, работающих на виде колебания H_{015} .

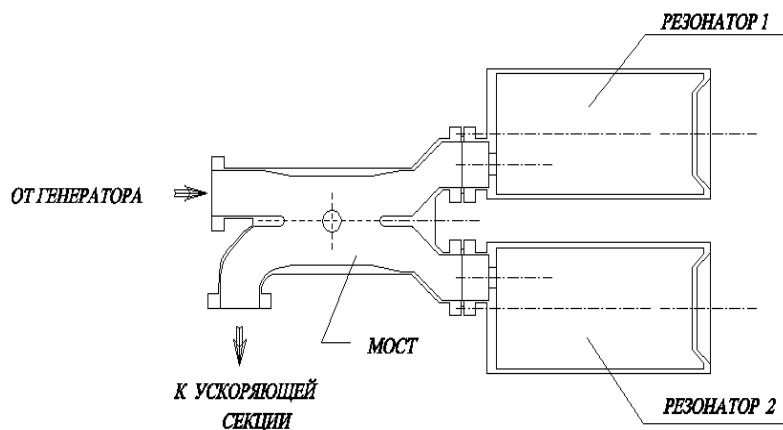


Рис. 5 Система умножения мощности SLED.

У резонаторов одна из стенок сделана подвижной, что дает возможность

оперативно настраивать с помощью шаговых двигателей систему умножения мощности на рабочую частоту УС. Предварительно были проведены "холодные" измерения параметров резонаторов (см. табл. 2).

Таблица 2. Параметры резонаторов системы умножения мощности.

Диаметр резонаторов D	196 мм
Высота резонаторов H	346,9 мм
Рабочая частота f_0	2856 МГц
Диапазон перестройки частоты : Δf	± 5 МГц
$\Delta f/\Delta H$	2,75 МГц/мм
Собственная добротность Q_0	86200
Коэффициент связи с подводщим волноводом β	9,8
Собственное время резонатора $\tau_0 = 2 Q_0/\omega_0$	9,6 мкс
Нагруженное время резонатора $T_c = \tau_0/(1 + \beta)$	0,9 мкс

ВЧ группирователь

Для предварительной группировки пучка на входе в ускоряющую структуру использовался ВЧ группирователь. Конструкция группирователя представлена на рис. 6. Он состоит из четырех связанных цилиндрических резонаторов (3 чашки + 1 трансформатор типа волны).

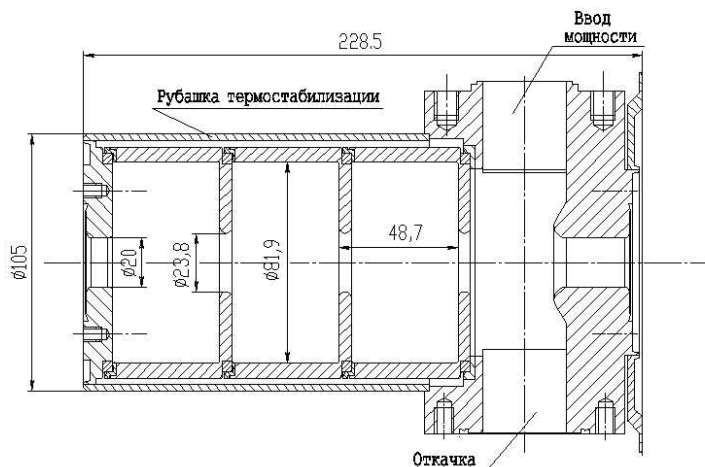


Рис. 6. Геометрические параметры ВЧ-группирователя.

Группирователь был изготовлен из материала с достаточно большим поверхностным сопротивлением – нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т. Имеется рубашка для обеспечения охлаждения и термостабилизации. Откачка осуществляется через отверстие, расположенное диаметрально противоположно вводу мощности, что к тому же симметризует распределение электрического поля в первой ячейке. Характеристики группирователя представлены в таблице 3.

Таблица 3. Параметры ВЧ-группирователя.

Внутренний диаметр ячейки $2b$	81.9 мм
Диаметр пролетного отверстия $2a$	23.8 мм
Толщина диафрагмы t	5 мм
Период D	48.7 мм
Резонансные частоты: f_1	2831.48 МГц
f_2	2841.92 МГц
(рабочая частота) $f_{0г} = f_3$	2856.45 МГц
f_4	2866.84 МГц
Собственная добротность на рабочей частоте $Q_{0г}$	3350
Рабочий вид колебаний θ	$4\pi/3$
Относительная фазовая скорость $\beta_{ф}$	0.695

Система термостабилизации

Контроль и управление температурой УС, нагрузки, ВЧ группирователя и резонаторов SLED осуществлялся системой термостабилизации. При этом стабилизация температуры обеспечивалась путем изменения температуры охлаждающей дистиллированной воды на входе в охлаждаемые системы. Параметры системы термостабилизации приведены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры системы термостабилизации.

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

Высоковольтная пушка

В качестве источника электронов использовалась трехэлектродная электронная пушка с оксидным катодом [3]. Основные параметры пушки приведены в таблице 5.

Таблица 5. Основные параметры электронной термопушки.

Энергия электронного пучка	до 200 кэВ
Длительность токового импульса (на полувывоте)	2÷350 нс
Импульсный ток	до 3 А
Частота повторения	до 50 Гц

Фокусирующая система

Фокусирующая система первого ускорительного модуля состоит из 2 бронированных линз, 6 кольцевых катушек (диаметр $d = 525$ мм, задающий ток до 510 А) и 3-х секционного соленоида (внутренний диаметр $d = 174$ мм, внешний диаметр $D = 371$ мм, общая длина $L = 2210$ мм, задающий ток до 1100 А).

Для проводки ускоренного пучка до магнитного спектрометра и цилиндра Фарадея использовались квадрупольные дублеты. Корректировка траектории пучка осуществлялась магнитными корректорами, расположенными в различных местах ускоряющего тракта.

Система управления позволяла оперативно изменять токи в любом элементе фокусирующей системы.

Система диагностики пучка

Система диагностики пучка включала в себя измерение следующих его параметров: импульсного тока и полного заряда пучка с электронной пушки, заряда и энергетических характеристик ускоренного пучка, а также его положения на входе и выходе УС.

Импульсный ток пушки измерялся с помощью резистивного датчика, установленного на выходе пушки.

Измерения энергетических характеристик пучка проводились при помощи 180° магнитного спектрометра, после которого пучок попадал на люминофорный экран. Зная величину магнитного поля в спектрометре и диаметр поворота пучка можно определить энергию ускоренных электронов, 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 распределение поля в зазоре между полюсами. После этих измерений энергия пучка в рабочем диапазоне токов 1700-2100 А определялась по формуле

$$U[\text{МэВ}] = 1.62 \frac{I[\text{А}]}{2100} D[\text{см}],$$

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 $\pm 3\%$. Заряд ускоренного пучка измерялся цилиндром Фарадея, расположенным после люминофорного экрана.

Положение пучка на входе в УС контролировалось люминофорным экраном, а на выходе - полосковыми двухкоординатными датчиками.

Результаты измерений с коротким сгустком

В этих экспериментах импульсный ток электронов, инжектируемый в секцию, составлял ≈ 3 А при длительности 2 нс. При такой длительности поле излучения сгустков мало и не оказывает существенного влияния на процесс ускорения, а ускоряющее поле в УС определяется только входной мощностью генератора. В таком режиме можно получить максимальный темп ускорения в УС и, следовательно, максимальную энергию ускоренного пучка.

На рис. 7 показан рабочий импульс ВЧ на входе и на выходе системы умножения мощности (на входе в ускоряющую секцию).

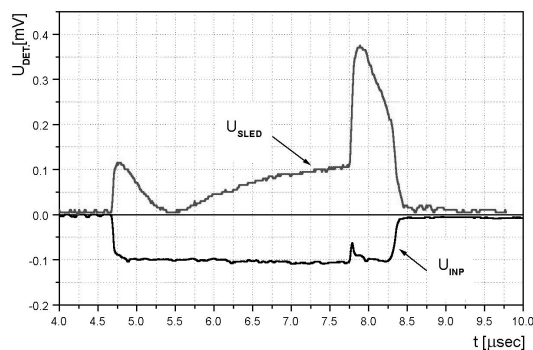


Рис. 7. ВЧ импульс на входе и выходе системы умножения мощности.

В качестве примера на рис. 8 приведены импульсы ВЧ, полученные при тренировке ускоряющей секции во время пробов.

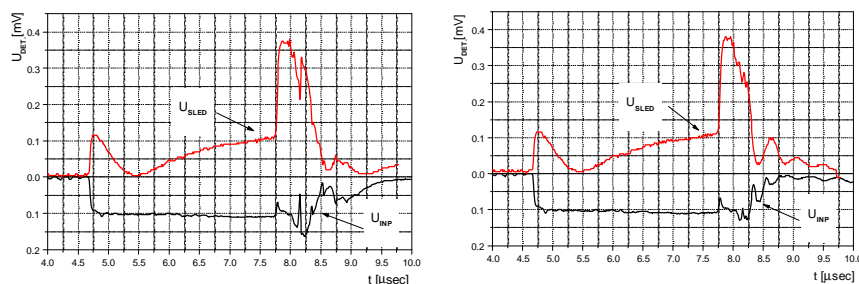


Рис. 8. Формы ВЧ импульсов на входе и выходе системы умножения мощности при пробоях в системе.

По форме импульса после системы умножения мощности методом регресс-анализа были вычислены рабочие параметры резонаторов умножителя:

$$\begin{aligned} \text{собственная добротность резонаторов} & Q_0 = 7.58 \cdot 10^4; \\ \text{собственное время резонаторов} & \tau_0 = 8.45 \text{ мкс}; \\ \text{коэффициент связи с подводящим волноводом} & \beta = 8.2; \\ \text{нагруженное время резонаторов} & T_c = \frac{\tau_0}{1 + \beta} = 0.92 \text{ мкс}; \end{aligned}$$

а также характерные времена переходных процессов входного сигнала:

$$\tau_1 = 0.021 \text{ мкс} - \text{характерное время нарастания переднего фронта амплитуды падающей волны};$$

$$\tau_2 = 0.044 \text{ мкс} - \text{характерное время переворота фазы на } 180^\circ.$$

Для примера на рис. 9 приведены формы импульсов после системы умножения мощности при амплитуде импульсной входной мощности $P_{inp} = 50$ МВт.

Зная форму ВЧ импульса на входе в ускоряющую секцию и характеристики самой секции, можно рассчитать распределение амплитуды ускоряющего электрического поля вдоль УС в различные моменты времени. Для структуры с постоянным импедансом

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

где $E_0(t) = E(0, t)$ - амплитуда электрического поля на входе в УС при $z = 0$.

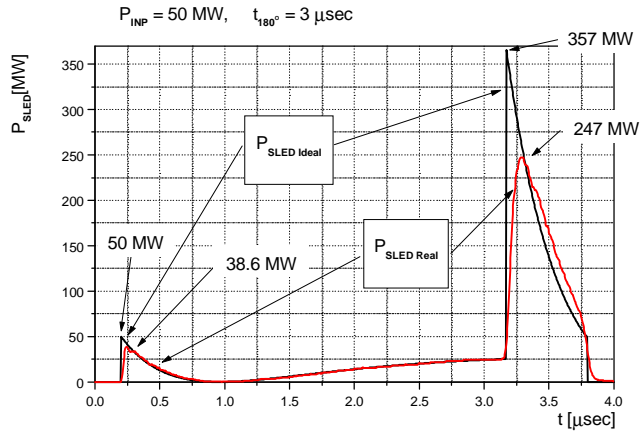


Рис. 9. Форма импульса после системы умножения мощности.

На рис. 10 показаны такие распределения ускоряющего поля в зависимости от координаты z вдоль секции в различные моменты времени t ,

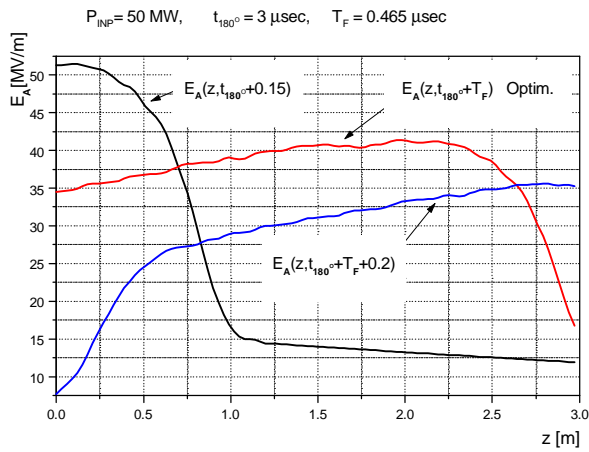


Рис. 10. Распределение электрического поля вдоль УС в различные моменты времени.

рассчитанные по реальной форме ВЧ импульса, приведенного на рис. 9 (входная мощность $P_{inp} = 50$ МВт).

Энергия, набираемая ускоряемой частицей, влетающей в УС в момент времени t , при условии $v_{gr} \ll c$ (т.е. частица "мгновенно" пролетает УС),

$$U(t) = e \int_0^L E(z,t) dz .$$

Так как в различные времена влета ускоряемого пучка в УС заполнение ВЧ энергией секции различно, то в зависимости от времени влета пучок, пролетев УС, набирает разную энергию. На рис. 11 показана зависимость энергии пучка W_{out} от времени t влета в УС.

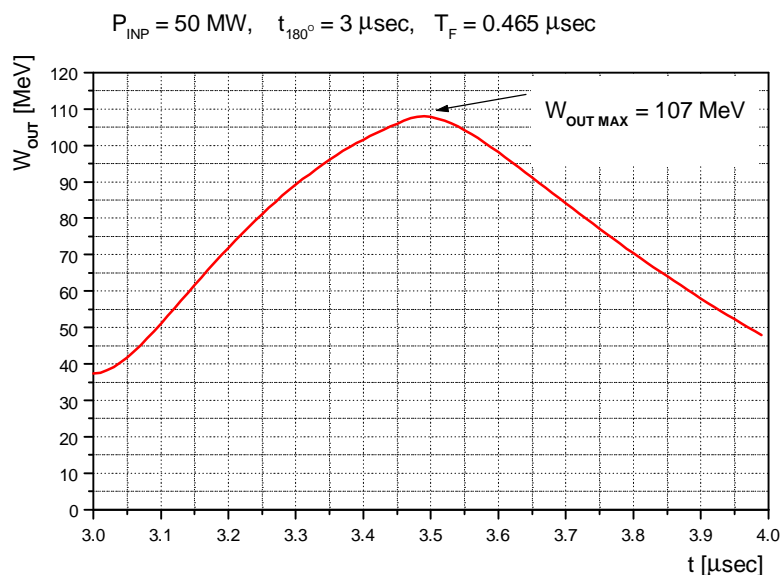


Рис. 11. Зависимость энергии пучка от времени влета в УС.

К настоящему времени в режиме работы с пучком малой длительности на выходе первой ускоряющей секции получен ускоренный пучок с числом электронов в импульсе $2 \cdot 10^{10}$ частиц. Достигнут средний темп ускорения 35 МэВ/м. При этом, как видно из рис. 10, максимальная

амплитуда ускоряющего поля в первых ячейках секции достигала значения более 50 МВ/м.

Ускоряющая секция работала с частотой повторения 5 Гц (выходная энергия электронов 106 МэВ) с одним пробоем за 40 минут, а с частотой повторения 50 Гц (выходная энергия 75 МэВ) без пробоев. На рис. 12 - 13 приведены фотографии люминофорного экрана при работе ускорителя с включенным ВЧ группирователем и без ВЧ группировки.



Рис. 12. Ускоренный пучок при работе с ВЧ группирователем.

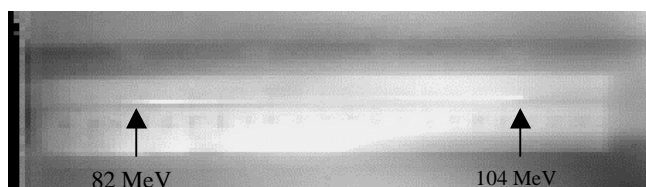


Рис. 13. Ускоренный пучок при работе без ВЧ группирователя.

При работе с ВЧ группирователем энергетический разброс в пучке составлял $\pm 0.5\%$.

Результаты и анализ экспериментов с длинным сгустком

Целью этих экспериментов было испытание УС в режиме, близком к рабочему в проекте ускорителя для ИРЕН [3], а именно: инжектируемый в нее ток должен составлять не менее 1.5 А при длительности ≈ 250 нс. Такая длительность сгустка уже сравнима с длительностью рабочей части ВЧ импульса. В этом режиме УС работает с сильной нагрузкой током, что приводит к заметному изменению ускоряющего поля УС и характеристик ускоренного пучка. Этот режим характерен для получения пучков с большим энергосодержанием.

Условия проведения испытаний:

частота следования импульсов	$F = 1 \div 5$ Гц;
напряжение на электронной пушке	$U = 170$ кВ;
импульсный ток пушки	$I_G = 2.6$ А;
длительность импульса тока	$\tau_b = 310$ нс;
выходная мощность клистрона	$P_{kl} \approx 50$ МВт;
длительность ВЧ импульса	$\tau_{kl} = 3.6$ мкс;
время до переворота фазы на 180°	$t_{180^\circ} = 2.83$ мкс.

Помимо ранее перечисленных сигналов в этой серии экспериментов измерялись так же:

1. Импульс тока с резистивного датчика, установленного на выходе электронной пушки.
2. Сигналы с датчика измерителя параметров пучка (ИПП), установленного на выходе магнитного спектрометра. Датчик представлял собой набор приемников заряда с емкостью 5.8 нФ каждый и позволял измерять заряд с разрешением по энергии ≈ 1.8 МэВ.

Сигналы с детекторных головок, резистивного датчика и с ИПП оцифровывались АЦП с временным разрешением 10 нс, запоминались для дальнейшей обработки и выводились на монитор управляющей машины для визуального контроля.

В этом эксперименте мощность на ВЧ группирователь не подавалась и на вход в ускоряющую секцию поступал несгруппированный сгусток, поэтому ускоренный пучок имел большой энергетический разброс. На рис. 14 показана фотография люминофорного экрана, полученная до установки ИПП, а на рис. 15 - сигнал с ИПП – зависимость плотности частиц от энергии, соответствующая максимуму энергосодержания пучка.

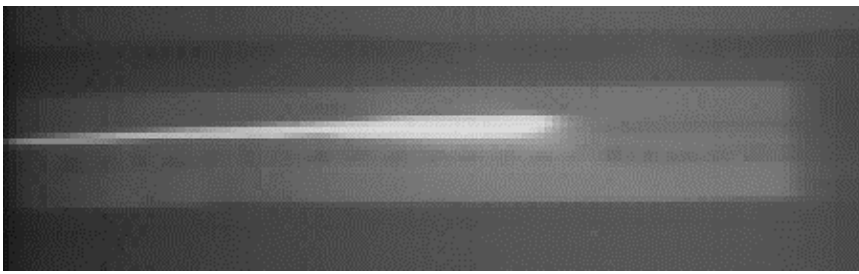


Рис. 14. Фотография ускоренного пучка.

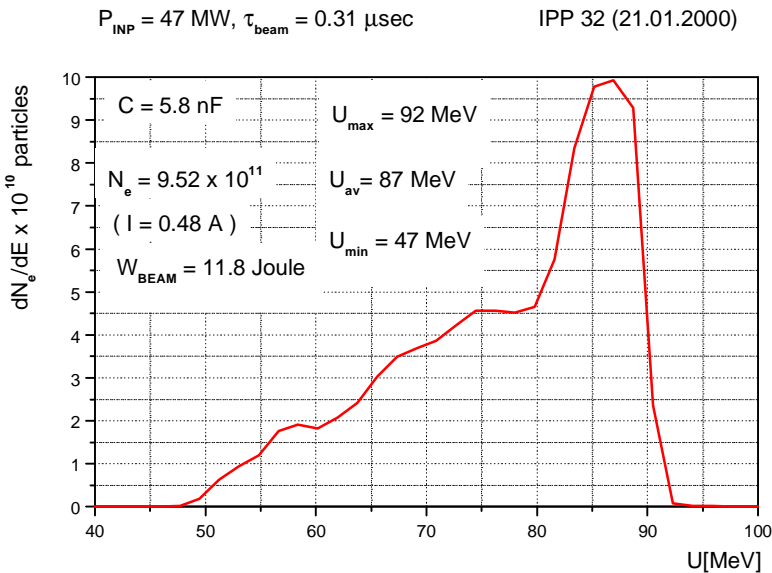


Рис. 15. Распределение плотности частиц в сгустке в зависимости от энергии.

Максимальная энергия электронов в ускоренном пучке – 92 МэВ, минимальная – 47 МэВ, полный заряд пучка – $Q = 1.52 \cdot 10^7$ Кл (полное число частиц – $N_e = Q/e = 9.52 \cdot 10^{11}$). Зная распределение плотности частиц и их энергию, можно посчитать полное энергосодержание пучка:

$$W_{BEAM} = \sum_{i=1}^N U_i \cdot (\Delta Q_i / e) = 11.8 \text{ Дж},$$

где $N = 57$ – число ламелей ИПП,

ΔQ_i и U_i – заряд на i -й ламели и соответствующая ему энергия.

Кроме того, измерялся уровень ВЧ мощности, поступающей в нагрузку после ускоряющей секции (см. рис. 16) с пучком и без него. Здесь же показаны сигналы импульса тока с электронной пушки, полученные с помощью резистивного датчика. Эти сигналы несколько искажены реактивным сопротивлением самого датчика. С учетом этих искажений видно, что импульс тока пушки имеет прямоугольную форму с длительностью $\tau_B = 310$ нс.

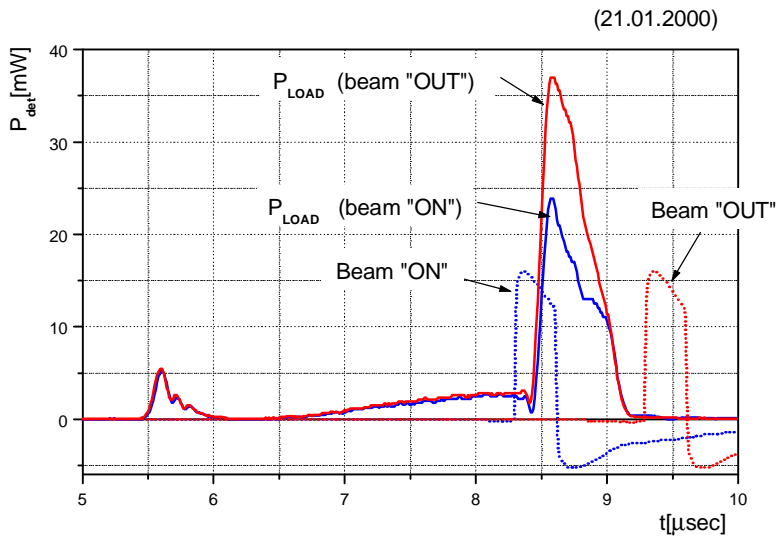


Рис. 16. ВЧ сигналы на выходе первой секции при нагрузке пучком и без него и токовый сигнал с резистивного датчика электронной пушки.

Уменьшение уровня ВЧ сигнала вызвано поглощением части мощности в УС электронным пучком на его ускорение и наличием поля излучения самого сгустка.

Зная форму ВЧ импульса на входе в секцию после системы умножения

мощности (см. рис. 17) и параметры самой секции, можно полностью восстановить распределение амплитуды ускоряющего поля от такого входного импульса в УС в различное время

$$E_{gen}(z,t) = \sqrt{2R_{sh}\alpha \cdot P_{0\ SLED} \left(t - \frac{z}{v_{gr}} \right)} e^{-\alpha z},$$

где R_{sh} шунтовое сопротивление УС,

α - коэффициент затухания,

$P_{0\ SLED}(t) = P_{SLED}(0,t)$ - ВЧ мощность на входе в УС при $z = 0$.

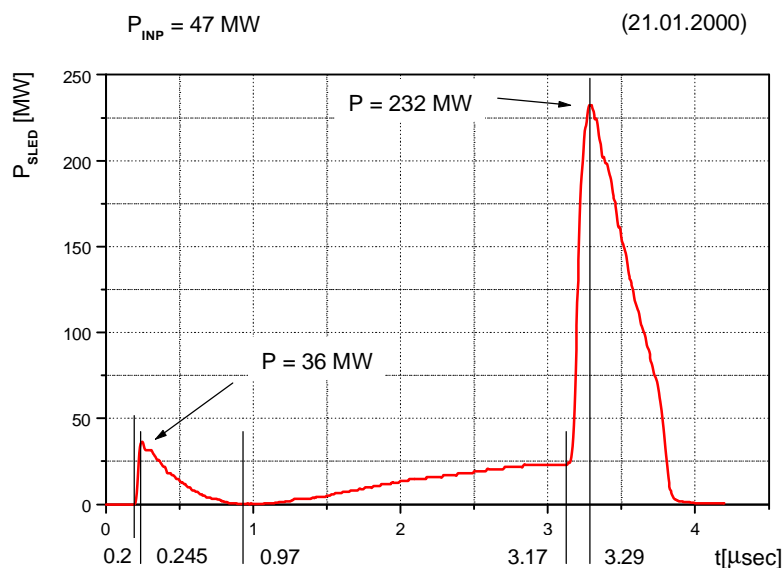


Рис. 17. Распределение ВЧ мощности на входе в УС.

Задавая ток на входе в секцию в виде импульса прямоугольной формы с амплитудой I_0 и длительностью τ_b , можно рассчитать распределение амплитуды поля излучения сгустка вдоль УС в различное время $E_b(z,t)$. При длительности импульса тока $\tau_b < T_f$, где T_f - время заполнения секции ВЧ мощностью, $E_b(z,t)$ есть (см. рис. 18):

$$E_b(z,t) = R_{sh} I_0 \cdot \frac{\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)}{\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \cdot \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_b \\ 1 - e^{-\alpha z} & \text{при } 0 < z < (t - t_b) \cdot v_{gr} \\ 1 - e^{-\frac{t - t_b}{\tau_{0A}}} & \text{при } (t - t_b) v_{gr} < z < L = T_f v_{gr} \end{cases}$$

где t_b - время входа в УС сгустка,

τ_{0A} - характерное время УС,

v_{gr} - групповая скорость распространения мощности в УС,

Ψ - фазовая протяженность сгустка.

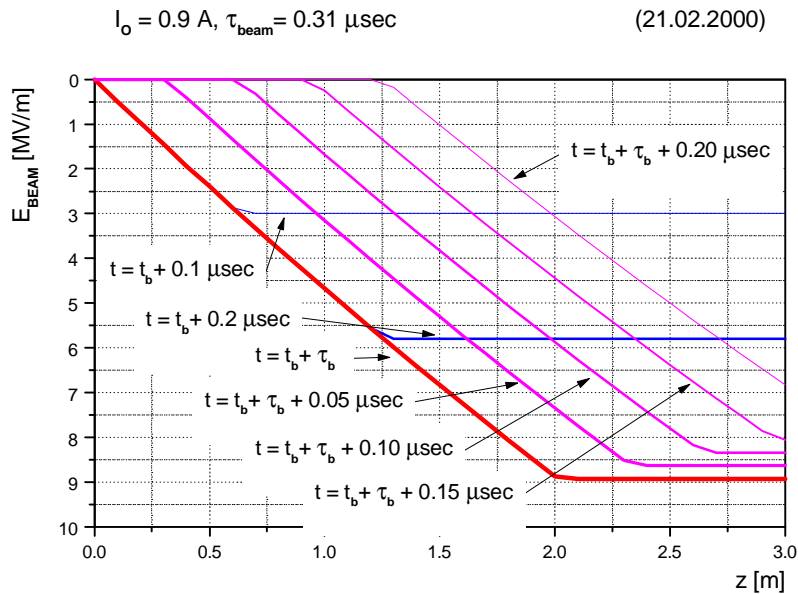


Рис. 18. Распределение амплитуды поля излучения сгустка вдоль УС в различные моменты времени.

Полное ускоряющее поле есть сумма этих двух полей:

$$E_{tot}(z,t) = E_{gen}(z,t) \cdot \cos(\Theta) - E_b(z,t),$$

где Θ - сдвиг фазы ВЧ поля генератора относительно центра сгустка.

Будем считать, что при пролете секции с большим градиентом ускоряющего поля частицы в основном группируются вокруг $\Theta = 0^\circ$. На рис. 19 показано распределение ускоряющего поля в УС в различные моменты времени с пучком и без него (на рисунке $t_{\text{ОПТИМ}}$ - время начала влета сгустка в УС, соответствующее максимальному энергосодержанию пучка).

Зная распределение поля вдоль УС можно найти энергию, набираемую ускоряемой частицей в зависимости от времени влета:

$$U(t) = e \int_0^L E_{\text{tot}}(z, t) dz .$$

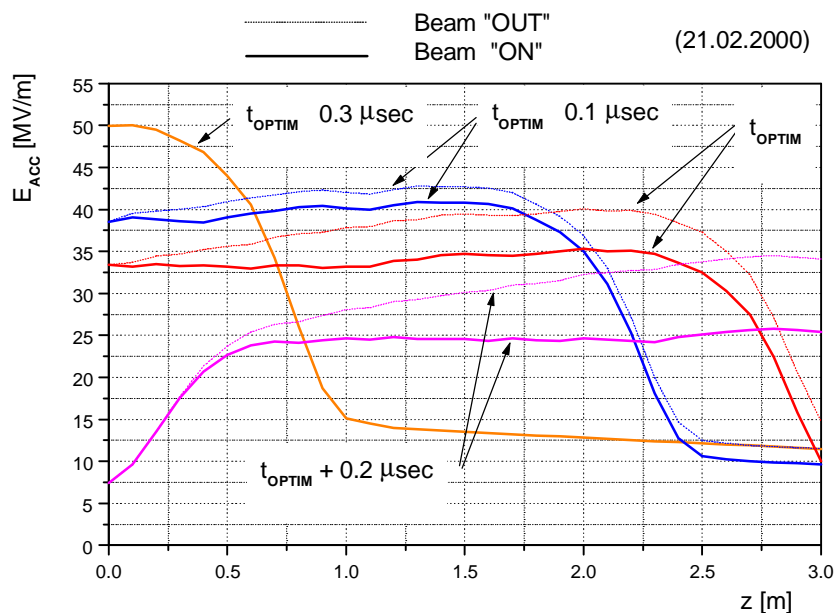


Рис. 19. Распределение ускоряющего поля в УС в различные моменты времени.

На рис. 20 изображена зависимость выходной энергии частиц от времени влета. Верхняя кривая соответствует ненагруженной пучком секции

($I_0 = 0$), средняя - нагруженной пучком УС при пролете первой секции, а нижняя – при пролете первой и второй секций (напомним, что во вторую секцию ВЧ мощность не подается).

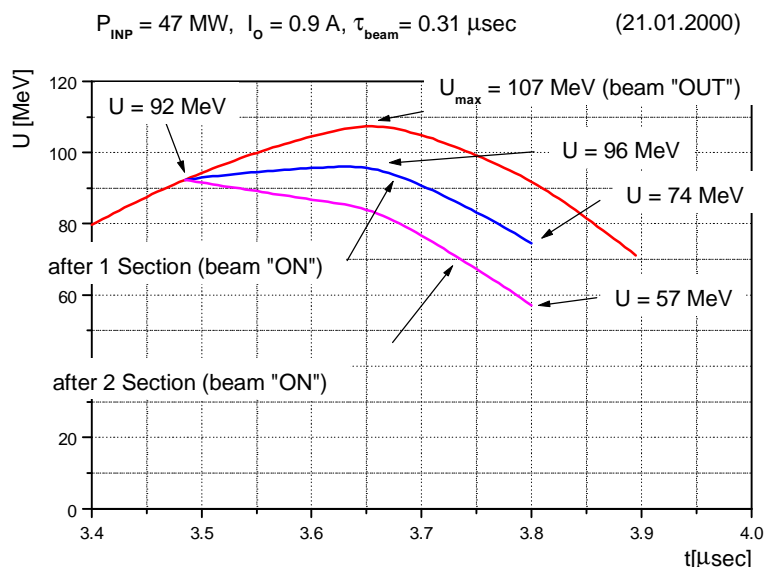


Рис. 20. Зависимость выходной энергии частиц от времени влета.

Зная распределение ускоряющего поля вдоль УС, можно найти зависимость мощности на выходе первой секции в различные моменты времени. На рис. 21 показаны распределения такой зависимости, полученные экспериментально (толстые линии) и рассчитанные по известной форме входного сигнала и задаваемого тока пучка I_0 (тонкие линии).

Из экспериментальных зависимостей выходной мощности с нагруженной и ненагруженной пучком УС можно выделить зависимость от времени поля излучения самого сгустка на выходе секции:

$$\Delta E_b(t) = \sqrt{2R_{sh}\alpha} \cdot \left(\sqrt{P_{Load}(beam\ "OUT")(t)} - \sqrt{P_{Load}(beam\ "ON")(t)} \right)$$

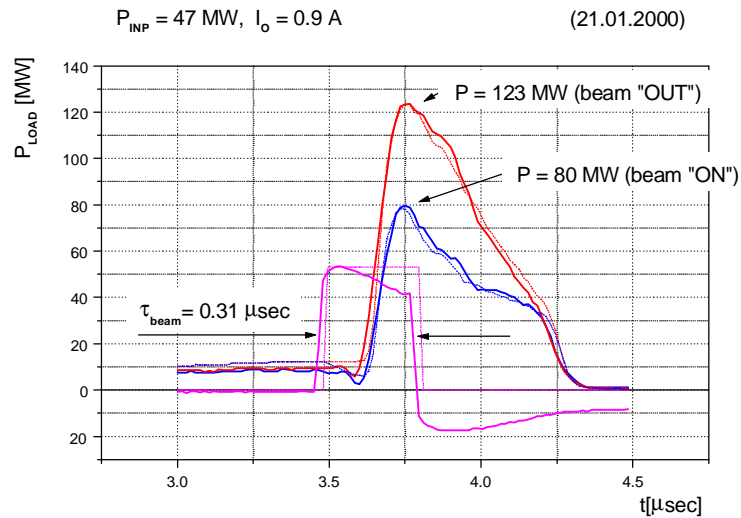


Рис. 21. Зависимость от времени мощности на выходе первой секции.

При пролете секции сгустка прямоугольной формы длительностью τ_b и амплитудой I_0 на выходе секции мы будем иметь следующее распределение амплитуды поля излучения сгустка в различные моменты времени:

$$E_b(L, t) = R_{sh} I_0 \cdot \frac{\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)}{\left(\frac{\Psi}{2}\right)} \cdot \begin{cases} 0 & 0 < t < t_b \\ 1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau_{0A}}}, & t_b < t < t_b + \tau_b \\ 1 - e^{-\frac{t-t_b}{\tau_{0A}}} - 1 + e^{-\frac{t-t_b-\tau_b}{\tau_{0A}}}, & t_b + \tau_b < t < t_b + T_f \\ e^{-\frac{t-t_b-\tau_b}{\tau_{0A}}} - e^{-\alpha L}, & t_b + T_f < t < t_b + \tau_b + T_f \\ 0 & t_b + \tau_b + T_f < t \end{cases}$$

где t_b - время начала влета сгустка в УС,

τ_b - длительность сгустка,

T_f - время заполнения секции.

На рис. 22 изображены экспериментальная и расчетная зависимости поля излучения пучка на выходе первой ускоряющей секции.

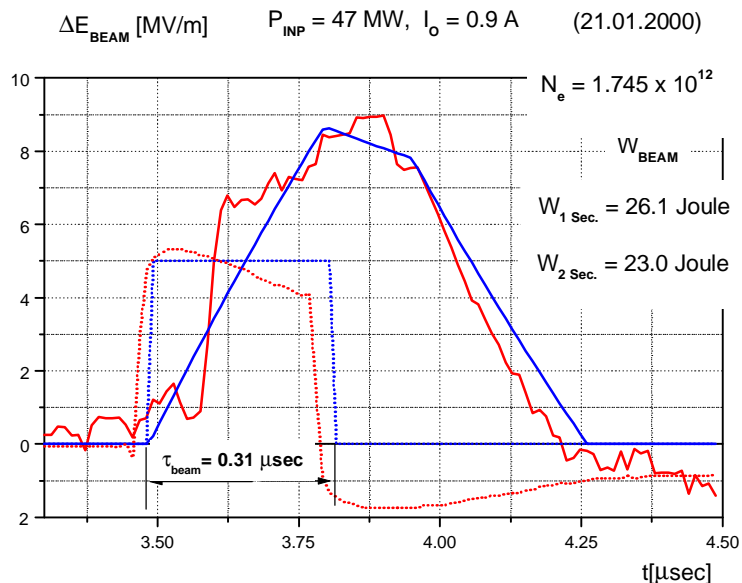


Рис. 22. Амплитуда поля излучения на выходе первой УС.

Видно, что в различные моменты времени их сравнивать довольно трудно. Поэтому сравнение проводилось интегрально, т.е. сравнивались интегралы по времени от экспериментальной кривой

$$Int_1 = \int_0^{\infty} \Delta E_b(L, t) dt = \int_{t_b}^{t_b + \tau_b} \Delta E_b(L, t) dt$$

и от расчетной

$$Int_2 = \int_{t_b}^{t_b + \tau_b} E_b(L, t) dt = R_{sh} Q \cdot \frac{\sin\left(\frac{\Psi}{2}\right)}{\frac{\Psi}{2}} \cdot (1 - e^{-\alpha L}),$$

здесь $Q = I_0 \cdot \tau_b$ - полный заряд сгустка.

Приравнивая эти интегралы и учитывая максимальную энергию, измеренную ИПП ($U_{max} = 92$ МэВ), можно вычислить полный заряд ускоренного в первой секции пучка $Q = 2.8 \cdot 10^{-7}$ Кл и значение входной ВЧ мощности $P_{INP} = 47$ МВт. Тогда полное число частиц в импульсе

$$N_e = Q/e = 1.75 \cdot 10^{12},$$

а импульсный ток пучка

$$I_0 = \frac{Q}{\tau_b} = 0.9 \text{ А.}$$

Тогда энергосодержание пучка после пролета первой секции равно

$$W_{1 \text{ Sec.}} = \int_{t_b}^{t_b + \tau_b} U_1(P_{INP}, I_0, t) dN_e(t) = \frac{I_0}{e} \int_{t_b}^{t_b + \tau_b} U_1(P_{INP}, I_0, t) dt = 26.1 \text{ Дж,}$$

где $U_1(P_{INP}, I_0, t)$ - зависимость от времени влета энергии, набранной пучком после ускорения в первой секции. Энергосодержание пучка после пролета второй (не заполненной ВЧ мощностью) секции, при условии, что пучок пролетает ее без потерь, равно

$$W_{2 \text{ Sec.}} = \frac{I_0}{e} \int_{t_b}^{t_b + \tau_b} U_2(P_{INP}, I_0, t) dt = 23 \text{ Дж,}$$

где $U_2(P_{INP}, I_0, t) = U_1(P_{INP}, 2 \cdot I_0, t)$ - зависимость от времени влета энергии, набранной пучком после ускорения в первой секции и пролете незаполненной ВЧ мощностью второй секции.

Измеренный импульсный ток электронной пушки – $I_G = 2.6$ А, что при длительности импульса $\tau_b = 310$ нс соответствует числу электронов в импульсе $N_e = 5.2 \cdot 10^{12}$. Рассчитанное число частиц после ускорения в первой секции $N_e = 1.75 \cdot 10^{12}$. Таким образом $\approx 66\%$ частиц теряется в этом эксперименте из-за выключенного ВЧ группирователя.

Вспомним, что на ИПП, установленном после второй секции, было измерено число частиц в импульсе $N_e = 0.95 \cdot 10^{12}$. То есть примерно половина ускоренного пучка теряется во второй секции. Причины этих потерь в настоящее время выясняются.

Ускоритель для проекта ИРЕН состоит из двух ускоряющих модулей, в каждый из которых входят: клистрон 5045, умножитель мощности типа

SLED и одна ускоряющая секция [4]. В таблице 6 приведены проектный режим работы и параметры ускоренного пучка после первой ускоряющей секции этого ускорителя, параметры пучка, полученные в описанных выше экспериментах и пересчет этих параметров для выходной мощности клистрона $P_{kl} = 63$ МВт и частоты следования импульсов $F = 150$ Гц, что соответствует проектному режиму ускорителя для ИРЕН.

Таблица 6.

ИРЕН Эксп. Пересчет

выходная мощность клистрона	P_{kl} [МВт]	63	47	63
частота повторения импульсов	F [Гц]	150	2.5	150
импульсный ток	I_0 [А]	1.5	0.9	1.5
длительность импульса тока	τ_b [нс]	250	310	250
энергия пучка	U_{beam} [МэВ]	105	92	105
энергосодержание пучка	W_{beam} [Дж]	40	26	38.6
ср. мощн. в пучке	$P_{beam\ av.} = W_{beam} \cdot F$ [кВт]	6		5.8

Из таблицы следует, что с использованием разработанных для форинжектора ВЭПП-5 системы умножения мощности, ускоряющей секции и нагрузки можно изготовить ускоритель, удовлетворяющий требованиям проекта ИРЕН. При этом пучок на выходе первой секции будет иметь распределение энергии, показанное на рис. 23. Из рисунка видно, что в зависимости от времени начала импульса тока электронной пушки можно иметь на выходе секции пучок с малым энергетическим разбросом (нижняя кривая – $\Delta U \approx 7$ МэВ). При этом средняя мощность пучка будет несколько меньше максимальной (средняя кривая).

Заключение

Проведенные испытания показали, что ускоряющие секции, выполненные по разработанной и реализованной в ИЯФ технологии, обладают высокой электрической прочностью - ускоряющие поля в УС достигали значений более 50 МВ/м (средний темп ускорения - до 35 МэВ/м), что превышает проектные параметры ускоряющих секций форинжектора ВЭПП 5.

Испытания с длинным густком доказали возможность работы секции при большой нагрузке током для получения пучков с большой мощностью, таких как в проекте ускорителя для ИРЕН.

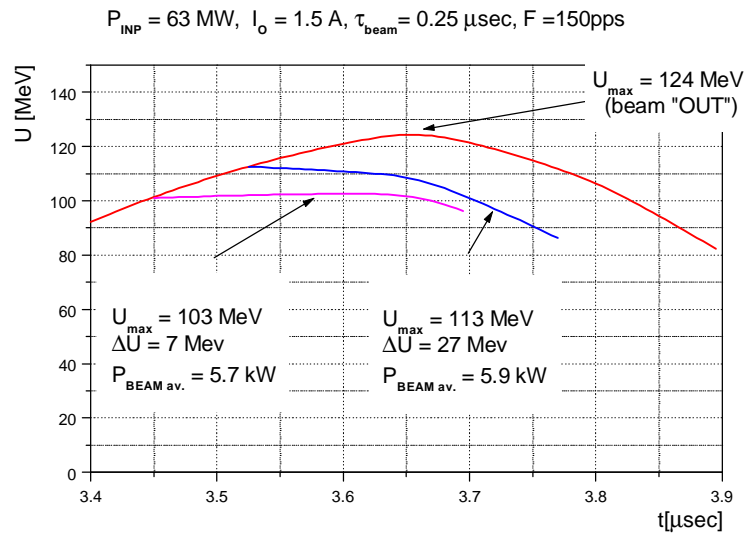


Рис. 23. Зависимость выходной энергии электронов от времени влета в сскцию.

Литература

- [1] A.V. Aleksandrov et al., "Preinjector for electron positron factories". Proc. 1994 XIV Conf. on Charge Part. Acc., Protvino, Russia.
- [2] A.V. Aleksandrov et al., "Electron positron preinjector of VEPP 5 complex". Proceedings of the XVIII International Linear Accelerator Conference, 26 30 August 1996, Geneva, Switzerland, Vol. 2, pp. 821 823.
- [3] Отчет о научно-исследовательской работе (договор N 92-4) "Линейный ускоритель электронов для интенсивного источника резонансных нейтронов (ИРЕН)", Новосибирск, 1993.
- [4] V. Antropov et. al., "IREN test facility at JINR". Proceedings of the XVIII International Linear Accelerator Conference, 26 30 August 1996, Geneva, Switzerland, Vol. 2, pp. 505 508.