

Испытание ускоряющей секции форинжектора ВЭПП-5

М.С. Авилов, В.Е. Акимов, А.В. Александров, А.В. Антошин, П.А. Бак, О.Ю. Баженов, Ю.М. Боймельштейн, 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

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

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.

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 ускорителей 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.

1. Ускоряющая секция

Ускоряющая секция форинжектора ВЭПП-5 представляет собой отрезок круглого диафрагмированного волновода с постоянным импедансом (постоянной геометрией ячеек вдоль УС) с двумя трансформаторами типа волны (ТТВ). Для уменьшения коэффициента перенапряженности скругление краев диафрагм выполнялось в виде эллипса с соотношением полуосей 1:2. Секция собиралась из двух одинаковых частей длиной 1.5 м. Пайка каждой части осуществлялась в вакуумной печи. Обе половины спаянных частей секции сваривались вместе через соединительную диафрагму, как показано на рис.1. 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.1). Параметры ускоряющей секции представлены в табл. 1.

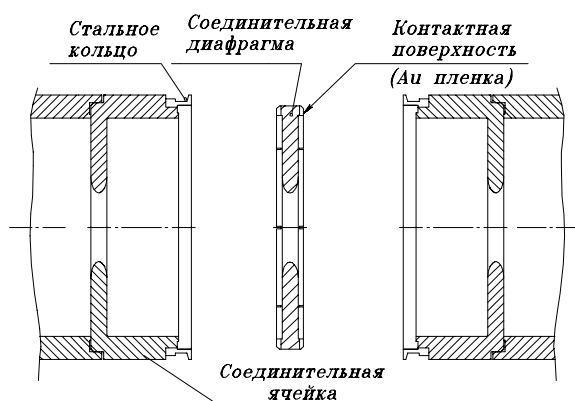


Рис. 1. Соединение двух частей УС.

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_{gr}	0.021
Длина секции L	2.93 м
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

2. Схема проведения испытаний

Испытания проводились на базе начальной части форинжектора (первый ускорительный модуль). Ускорительный модуль включает в себя электронную пушку, субгармонический группирователь, ВЧ- группирователь, три УС, ВЧ-модуль на базе клистрона 5045, систему умножения мощности типа SLED, фокусирующую систему и систему диагностики пучка. Схема испытания показана на рис. 2.

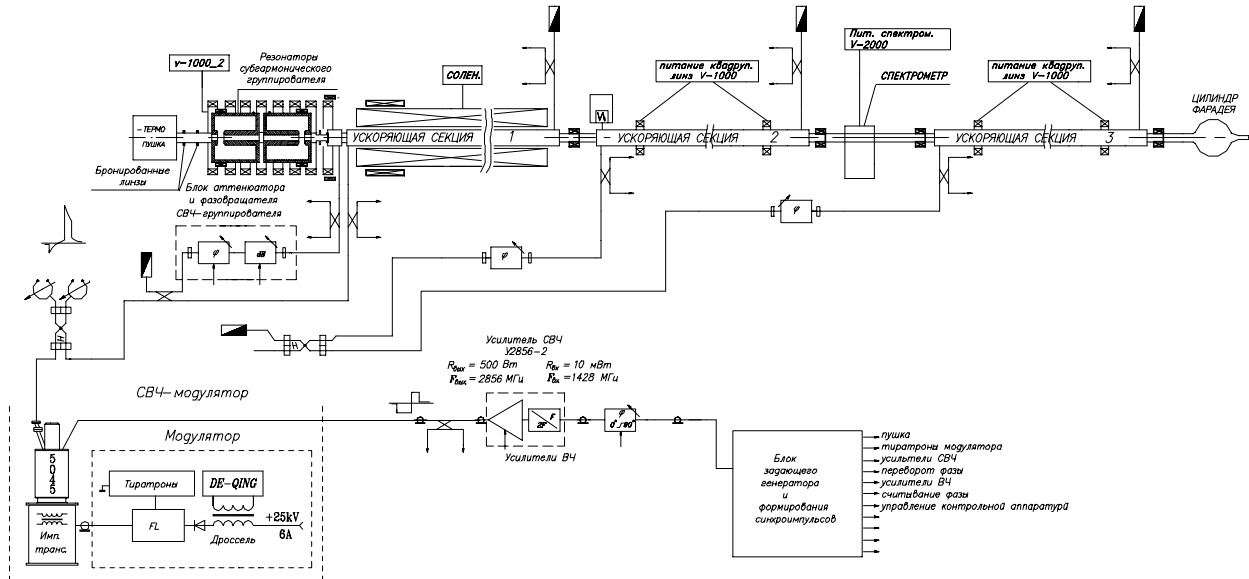


Рис. 2. Схема испытания ускоряющей секции.

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) [3,4].

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. Энергетический разброс в пучке оценивался по размеру и относительной яркости светящегося пятна на люминофоре. 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.

Контроль и управление температурой УС, нагрузки, ВЧ-группирователя и резонаторов SLED осуществлялся системой термостабилизации. Рабочий диапазон температуры $25 \div 40^\circ\text{C}$, точность стабилизации температуры $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

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

3. Результаты экспериментов с коротким сгустком

Условия проведения испытаний:

- частота следования импульсов $F = 5 \div 50$ Гц;
- напряжение на электронной пушке $U = 170$ кВ;
- импульсный ток пушки $I_G = 3$ А;
- длительность импульса тока $\tau_b = 2$ 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.

По форме импульса после системы умножения мощности (см. рис. 3) методом регресс-анализа были вычислены рабочие параметры резонаторов SLED:

- собственная добротность резонаторов $Q_0 = 7.58 \cdot 10^4$;
 - собственное время резонаторов $\tau_0 = 8.45$ мкс;
 - коэффициент связи резонаторов $\beta = 8.2$;
 - нагруженное время резонаторов $T_c = \tau_0 / (1 + \beta) = 0.92$ мкс;
- а также характерные времена переходных процессов входного сигнала:
- $\tau_1 = 0.021$ мкс – характерное время нарастания переднего фронта амплитуды падающей волны;
 - $\tau_2 = 0.044$ мкс – характерное время переворота фазы на 180°

мощности.

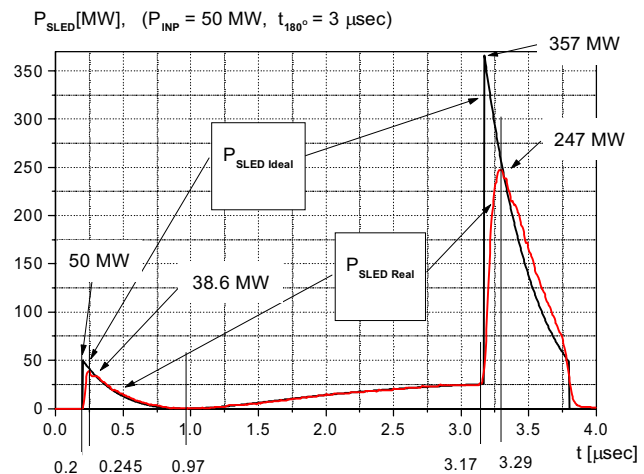


Рис. 3. Форма импульса после системы умножения мощности.

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

4. 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.

В этой серии экспериментов, кроме того, измерялись 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.

В этих экспериментах мощность на ВЧ-группирователь не подавалась и на вход в ускоряющую секцию поступал несгруппированный сгусток, поэтому ускоренный пучок имел большой энергетический разброс. На рис. 4 показан сигнал с ИПП – зависимость плотности частиц от энергии, соответствующая максимуму энергосодержания пучка.

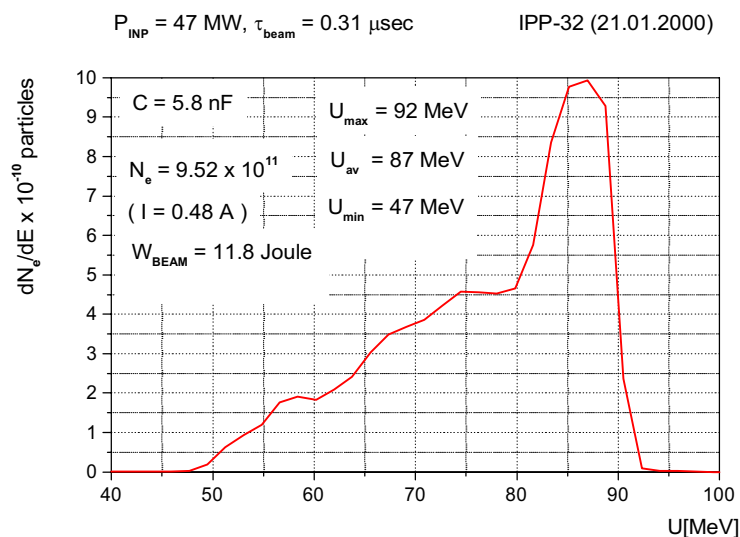
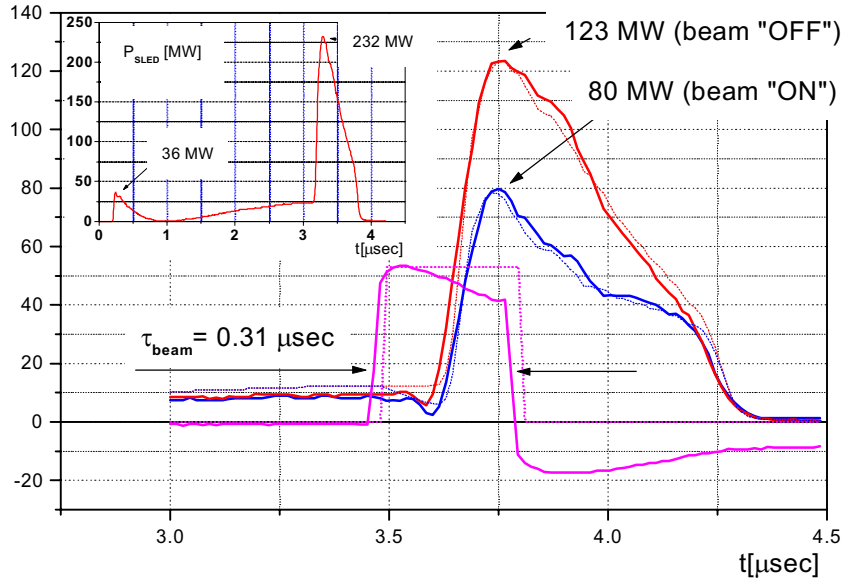


Рис. 4. Распределение плотности частиц в сгустке в зависимости от энергии.

Максимальная энергия электронов в ускоренном пучке 92 МэВ, минимальная – 47 МэВ, полный заряд пучка $1.52 \cdot 10^7$ Кл (полное число частиц $9.52 \cdot 10^{11}$), энергосодержание пучка 11.8 Дж.

Кроме того, измерялся уровень ВЧ-мощности, поступающей в нагрузку после ускоряющей секции (см. рис. 5) с пучком и без него (толстые линии). Здесь же показан сигнал импульса тока с электронной пушки, полученный с помощью резистивного датчика. Этот сигнал несколько искажен реактивным сопротивлением самого датчика. С учетом этих искажений видно, что импульс тока пушки имеет прямоугольную форму с длительностью $\tau_B = 310$ нс.



Уменьшение уровня ВЧ-сигнала вызвано поглощением части мощности в УС электронным пучком

Рис. 5. ВЧ-сигналы на выходе первой секции при нагрузке пучком и без него и токовый сигнал с резистивного датчика.

на его ускорение и наличием поля излучения самого сгустка.

При известной форме ВЧ-импульса на входе в секцию после системы умножения мощности и параметрах самой секции с постоянным импедансом распределение амплитуды ускоряющего поля в УС в различные моменты времени есть:

$$E_{gen}(z, t) = \sqrt{2R_{sh}\alpha \cdot P_0 SLED \left(t - \frac{z}{v_{gr}} \right)} e^{-\alpha z},$$

где $P_0 SLED(t) = P_{SLED}(0, t)$ – ВЧ- мощность на входе в УС при $z = 0$.

Если ток на входе в секцию имеет форму прямоугольника с амплитудой I_0 и длительностью $\tau_b < T_f$, где T_f – время заполнения секции ВЧ-мощностью, то распределение амплитуды поля излучения сгустка вдоль УС в различные моменты времени есть:

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

где t_b – время входа сгустка в УС; \varnothing – фазовая протяженность сгустка.

Полное ускоряющее поле есть сумма этих двух полей:

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

где $\tilde{\epsilon}$ – сдвиг фазы ВЧ-поля генератора относительно центра сгустка.

Будем считать, что при пролете секции с большим градиентом ускоряющего поля частицы в основном группируются вокруг $\tilde{\epsilon} = 0^\circ$. На рис. 5 тонкими линиями показаны рассчитанные таким способом зависимо-

сти ВЧ-мощности, идущей в нагрузку после ускоряющей секции с пучком и без него $P_{LOAD}(t) = \frac{E_{tot}(L,t)^2}{2 \cdot \alpha \cdot R_{sh}}$,

где L – длина секции. Энергия, набираемая ускоряемой частицей в зависимости от времени влета, есть:

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

На рис. 6 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).

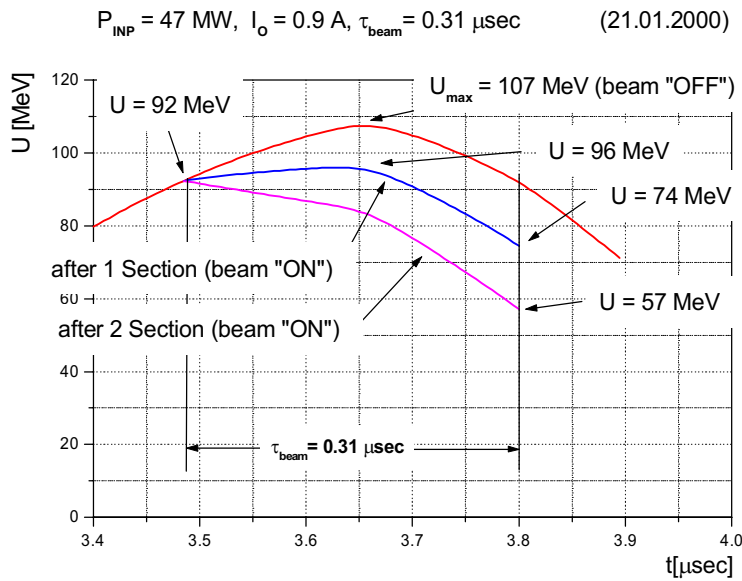


Рис. 6. Зависимость выходной энергии частиц от времени влета.

Из экспериментальных зависимостей выходной мощности с нагруженной и ненагруженной пучком УС (см. рис. 5) можно выделить зависимость от времени поля излучения самого ступка на выходе первой секции:

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

Аналитически распределение амплитуды поля излучения ступка в различные моменты времени при пролете секции ступка прямоугольной формы длительностью τ_b и амплитудой I_0 на выходе первой секции записывается как:

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

На рис. 7 изображены экспериментальная и расчетная зависимости поля излучения пучка на выходе первой ускоряющей секции.

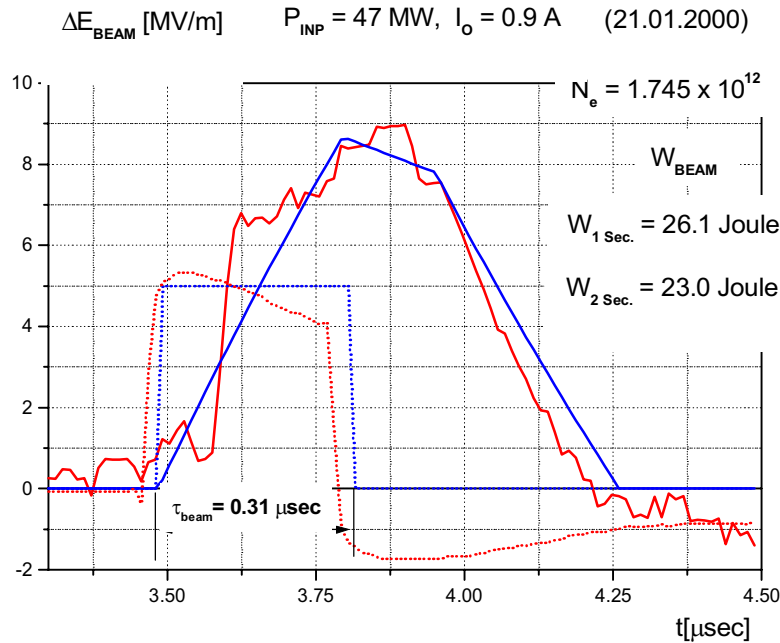


Рис. 7. Амплитуда поля излучения пучка на выходе первой УС.

Сравнение проводилось интегрально, т.е. сравнивались интегралы по времени от экспериментальной кривой:

$$Int_1 = \int_0^{\infty} \Delta E_b(t) dt = \int_{t_b}^{t_b + \tau_b} \Delta E_b(t) dt \quad \text{и от расчетной:} \quad Int_2 = \int_{t_b}^{t_b + \tau_b} E_b(L, t) dt = R_{sh} Q \cdot \frac{\sin\left(\frac{\varnothing}{2}\right)}{\frac{\varnothing}{2}} \cdot (1 - e^{-\alpha L}),$$

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

Приравнявая эти интегралы и учитывая максимальную энергию, измеренную ИПП ($U_{max} = 92$ МэВ), можно вычислить:

- амплитуду входной ВЧ-мощности $P_{INP} = 47$ МВт,
- импульсный ток пучка $I_0 = 0.9$ А,
- полный заряд ускоренного в первой секции пучка $Q = I_0 \cdot \tau_b = 2.8 \cdot 10^{-7}$ Кл,
- полное число частиц в импульсе $N_e = Q / e = 1.75 \cdot 10^{12}$,
- энергосодержание пучка после пролета первой секции

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

где $U_1(P_{INP}, I_0, t)$ – зависимость от времени влета энергии, набранной пучком ускорения в первой секции,

- энергосодержание пучка после пролета второй (не заполненной ВЧ-мощностью) секции, при условии, что пучок пролетает ее без потерь

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

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 не заполненной 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. На ИПП, установленном после второй секции, было измерено число частиц в импульсе $N_e = 0.95 \cdot 10^{12}$, т.е. примерно половина ускоренного пучка теряется во второй секции. Причины этих потерь в настоящее время выясняются.

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 требуемые проектные параметры ускоряющих секций форинжектора ВЭПП-5.

Испытания с длинным сгустком доказали возможность работы секции при большой нагрузке током для получения пучков с большой мощностью, таких как в проекте ускорителя для ИРЕН [3].

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.