

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

В 225

P9-88-383

**Ю.П.Вахрушин, А.А.Волжев, М.И.Демский,
В.В.Журавлев, Ю.А.Казанкин, С.Л.Платонов,
А.С.Томилин, Д.Е.Трифонов, В.И.Ульянов,
Р.В.Харьюзов, В.А.Швец, С.П.Ярадайкин**

**РЕЗУЛЬТАТЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИНЪЕКТОРНОГО УЧАСТКА
УСКОРИТЕЛЯ ЛИУ-30**

1988

ВВЕДЕНИЕ

Ускоритель ЛИУ-30 спроектирован в качестве инжектора импульсного реактора на быстрых нейтронах ИБР-2^{1/1}. Он рассчитан на получение пучка электронов с током 250 А в импульсе длительностью 500 нс при энергии 30 МэВ. Ускоритель состоит из инжекторного участка (ИУ), сообщающего электронам энергию 3 МэВ, и 5 ускорительных участков (УУ) на энергию 5,4 МэВ каждый. В инжекторном участке фокусировка пучка осуществляется соленоидальным магнитным полем с индукцией до $\sim 0,04$ Тл. В ускорительных участках пучок транспортируется в системе дискретных фокусирующих катушек. Длина ИУ составляет ~ 25 м, а каждого из УУ ~ 40 м. Внутренний радиус ускорительных трубок равен 37 мм. В течение 1987 года сотрудниками НИИЭФА им. Д.В.Ефремова и ЛНФ ОИЯИ были проведены исследования параметров пучка и наладка ИУ.

1. ДИАГНОСТИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Измерение параметров пучка осуществлялось комплексом диагностической аппаратуры, состоящим из систем измерения эмиттанса, профиля и энергетического спектра пучка^{2/2}. Аппаратура позволяла измерять эмиттанс, диаметр пучка, амплитуду когерентных колебаний и энергетический спектр после каждого импульса тока пучка во временных интервалах длительностью ~ 40 нс.

Блок-схема системы измерения эмиттанса пучка представлена на рис. 1. Она состоит из вакуумной камеры, в полости которой по пути пучка установлены графитовая щелевая диафрагма Д, фольговый флюоресцирующий экран ФЭ и охлаждаемое водой зеркало Z_1 . Посредством второго зеркала Z_2 изображение флюоресцирующего экрана переносится на телекамеру ТК. Телекамера состоит из двух последовательно соединенных электронно-оптических преобразователей (ЭОП) и видикона. Первый ЭОП работает как световой затвор, обеспечивая стробирование изображения с минимальным временным интервалом ~ 40 нс. Каждой вертикальной координате флюоресцирующего экрана можно сопоставить вполне определенную точку на фазовой плоскости. Если ТК расположить так, что изображения щелей параллельны строичной развертке, то интегральная величина от сигнала каждой строки будет пропорциональна фазовой плотности в точке, определяемой номером строки. После прохождения импульсом тока пучка системы синхрониза-

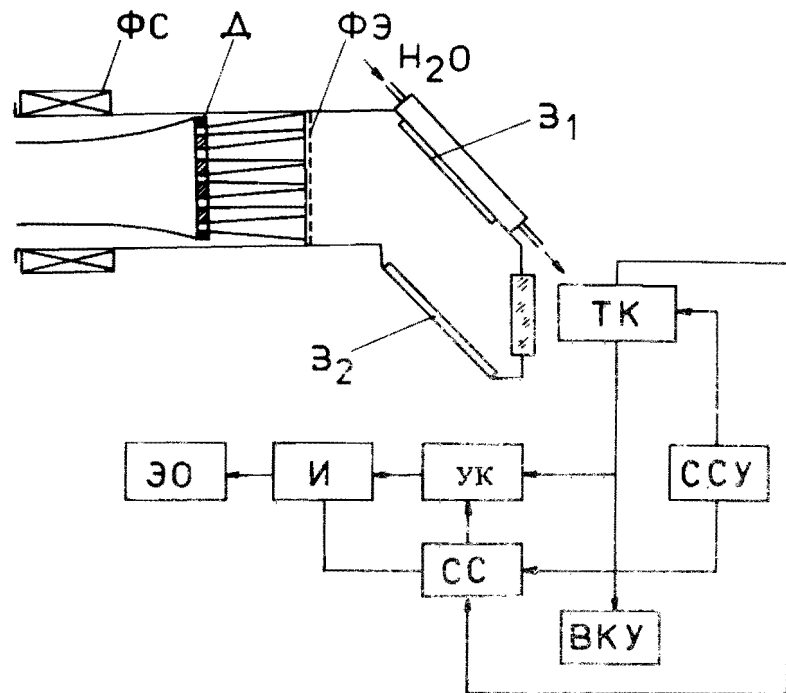


Рис. 1. Блок-схема системы измерения эмиттанса пучка.

ции СС и получения импульса синхронизации от системы синхронизации ускорителя ССУ открывается управляемый коммутатор УК на время следования одного кадра. Сигнал каждой строки этого кадра интегрируется интегратором И, сброс которого осуществляется от СС, управляемой строчными импульсами ТК. В результате на выходе И получается последовательность импульсов, амплитуда каждого из которых пропорциональна фазовой плотности в точке, определяемой временем его следования. Импульсы регистрируются электронным осциллографом ЭО с памятью и фотографируются. По снимку строится фазовый портрет. Для повышения точности измерения эмиттанса делалось несколько снимков для различных диаметров пучка на ФЭ путем изменения поля в фокусирующем соленоиде ФС. Одновременно с измерением эмиттанса на экране видеоконтрольного устройства ВКУ регистрируется эффективный диаметр пучка и его смещение от оси. На рис. 2 представлена характерная осциллограмма сигнала с выхода интегратора.

В качестве магнитного энергоанализатора использовался спектрометр с полукруговой фокусировкой, на выходе которого установлен фольговый флюоресцирующий экран, зеркало и смотровое окно. Све-

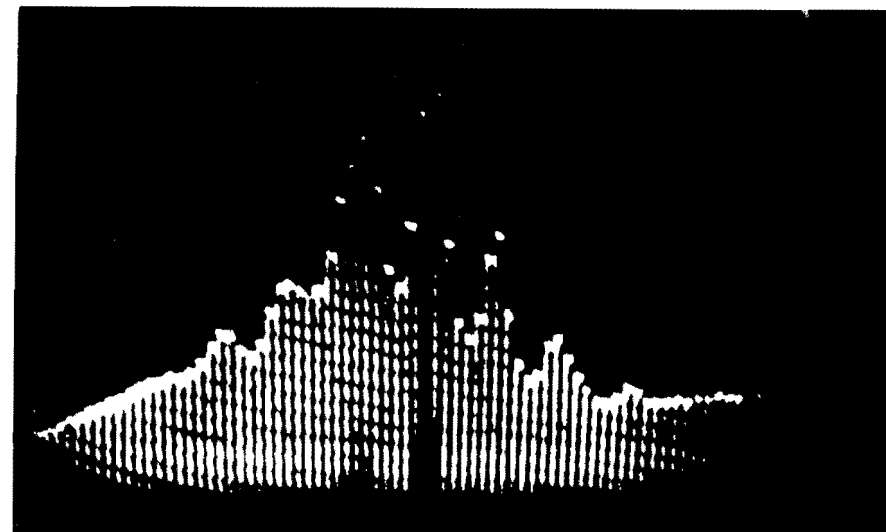


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с выхода интегратора системы измерения эмиттанса пучка.

чение экрана регистрировалось той же телекамерой, что и при измерении эмиттанса, расположенной так, что строчная развертка параллельна поверхности полюсов электромагнита. Сигнал строки, соответствующий середине флюоресцирующего экрана, совпадает по форме с энергетическим спектром пучка. Каждой точке временной развертки строчного сигнала сопоставляется определенная величина импульса электронов. При большой амплитуде и значительных сдвигах фазы когерентных колебаний не удавалось измерить усредненный за время импульса энергетический спектр электронов за один импульс тока пучка. Для построения усредненного во времени энергетического спектра с экрана ЭО фотографировались мгновенные энергетические спектры в промежутках времени ~40 нс при постоянном временном сдвиге. При этом регистрировалась амплитуда тока пучка, прошедшего в камеру анализатора, и ток пучка перед анализатором в соответствующий момент времени. Это позволяло пронормиро-

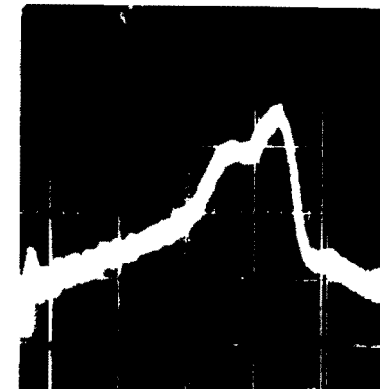


Рис. 3. Осциллограмма усредненного за время импульса энергетического спектра пучка, полученная на выходе первых четырех секций ИУ.

вать мгновенные энергетические спектры и восстановить усредненный за время импульса спектр пучка. При стабильном положении пучка в канале транспортировки в течение импульса на экране ЭО можно было наблюдать форму усредненного спектра пучка после каждого импульса. На рис. 3 представлена характерная осциллограмма усредненного за время импульса энергетического спектра пучка, полученная на выходе первых четырех секций ИУ при достаточно стабильном положении пучка в канале транспортировки.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПУЧКА

При измерении параметров пучка инжекторный участок, включающий 12 ускорительных секций, имел следующие особенности. В качестве источника электронов (ИЭ) была использована разработанная в ОИЯИ электронная пушка ЭЭП-2^{3/8}, питание которой осуществляется от импульсного генератора с многovitковым повышающим трансформатором, расположенным в одном масляном баке с катодной ножкой пушки. На выходе трансформатора формируется колоколообразный импульс длительностью ~2 мкс.

Неоднородность соленоидального магнитного поля в межсекционных промежутках достигала $\pm 30\%$ от средней величины поля в секциях.

Конструкция переходной области между ИЭ и первой секцией была рассчитана на ввод в ускоритель ламинарного пучка. Она имела длину ~65 см и состояла из последовательно установленных соленоида длиной ~10 см, магнитоиндукционного датчика и дисковой фокусирующей катушки толщиной ~3 см, закрепленной на торце секции.

Амплитуда тока пучка на выходе ИУ в течение всего времени экспериментов (первое полугодие 1987 г.) не превышала ~150 А при наилучшем коэффициенте токопрохождения около 85%. Токовый импульс на выходе ИУ имел колоколообразную форму с длительностью около 500 нс на полувысоте и около 200 нс по вершине. На рис. 4 представлены осциллограммы импульсов тока по длине ИУ. Без существенного укорочения длительности импульса, большего, чем 150 А, тока на выходе ИУ получить не удавалось. Большая неоднородность магнитного фокусирующего поля между секциями приводила к быстрому нарастанию амплитуды пульсаций огибающей пучка. Поэтому для проводки пучка через ускоритель экспериментально подбирались далеко не однородное распределение магнитного поля, обеспечивающее сдерживание роста пульсаций огибающей пучка. Провалы магнитного поля способствуют нарастанию амплитуды когерентных колебаний пучка. По-видимому, при подборе магнитного фокусирующего поля его оптимальное распределение определялось и нарастанием когерентных колебаний пучка. В итоге для каждого энергетического режима работы ускорителя подбирались новые распределения магнитного поля, обеспечивающие про-

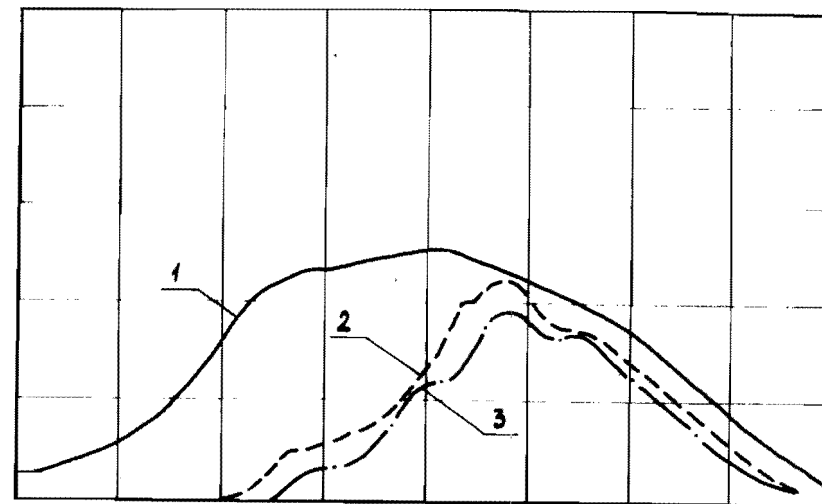


Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока пучка по длине инжекторного участка до проведения наладочных работ: 1 — на выходе источника электронов; 2 — на выходе 8-й секции; 3 — на выходе 11-й секции. Масштаб: по вертикали — 65 А на деление; по горизонтали — 200 нс на деление.

водку пучка с минимальными потерями. Это осложняло эксплуатацию ускорителя и требовало много времени для вывода ускорителя в рабочий режим при проведении экспериментов. Результаты измерений эмиттанса пучка в виде зависимости нормализованного эмиттанса $\epsilon_n = (1/\pi) \times \sqrt{\gamma^2 - 1} \int x' dx'$, соответствующего определенной доле тока $I/I_{\text{макс}}$ от величины этой доли, представлены на рис. 5 (γ — релятивистский фактор электронов).

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что пучок имеет явно неламнарную структуру. Радиальная неоднородность внешнего фокусирующего поля и собственных полей пучка вызывает заметный рост нормализованного эмиттанса по тракту транспортировки.

Усредненный за время импульса энергетический спектр имел, как правило, два максимума (рис. 3). Ширина усредненного за время импульса энергетического спектра по основанию кривой распределения на выходе ИУ и первых четырех секций составила около 20% от максимальной энергии электронов $E_{\text{макс}}$, а на полувысоте кривой распределения — около 10%. Мгновенные энергетические спектры (в интервалах времени ~40 нс) имели ширину по основанию кривой распределения 1,5-4,5% от $E_{\text{макс}}$. На выходе ИУ наблюдалась нестабильность величины максимума мгновенных энергетических спектров от импульса к импульсу на уровне 2-3% от $E_{\text{макс}}$.

Амплитуда когерентных колебаний на выходе ИУ достигала ~15 мм, а на выходе первых четырех секций — ~5 мм. Вследствие большого

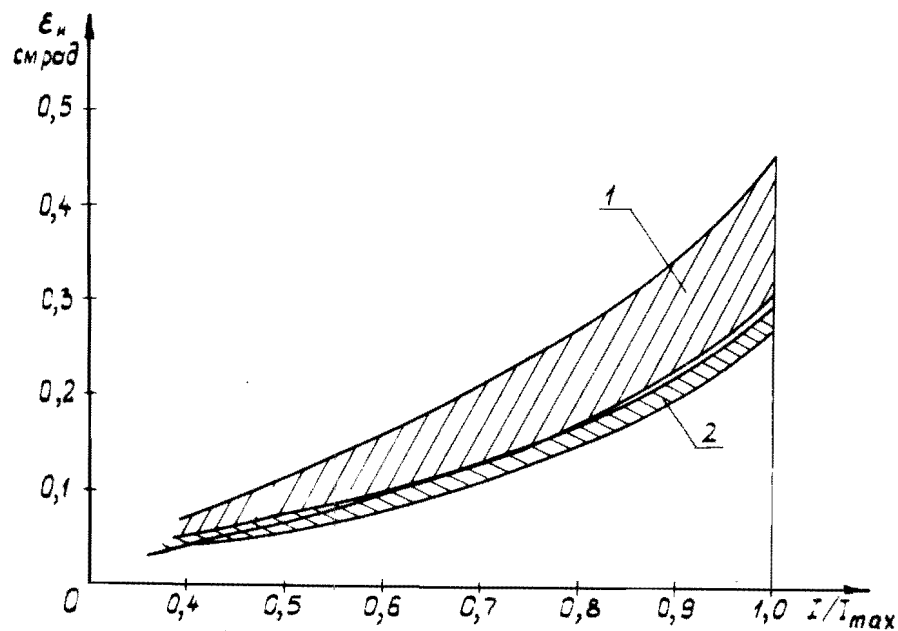


Рис. 5. Зависимость величины нормализованного эмиттанса пучка ϵ_n от заключенной в нем доли тока $I/I_{\text{макс}}$: 1 — область значений ϵ_n для различных участков времени в пределах вершины импульса тока на выходе инжекторного участка при $\sqrt{\gamma^2 - 1} \approx 5,8$ и $I_{\text{макс}} = 127$ А; 2 — область значений ϵ_n для различных участков времени в пределах вершины импульса тока на выходе источника электронов при $\sqrt{\gamma^2 - 1} \approx 1,1$ и $I_{\text{макс}} = 150$ А.

энергетического разброса по длительности импульса фаза когерентных колебаний в точке наблюдения менялась в течение длительности импульса, что визуально проявлялось в повороте пучка относительно оси канала на угол до $\sim 150^\circ$ на выходе ИУ за время импульса. Вследствие нестабильности мгновенных энергетических спектров на выходе ИУ положение пучка в стробируемый момент времени импульса тока менялось от импульса к импульсу в пределах ~ 10 мм.

Очевидно, что такое поведение пучка не позволяет пользоваться корректорами для возвращения пучка на ось, что особенно важно при проводке пучка в системе дискретных линз ускорительных участков.

Большая ширина энергетического спектра пучка является следствием того, что формируемый в ИЭ колоколообразный импульс тока вызывает провал на вершине импульсов ускоряющего напряжения. Неприемлемый для работы корректоров азимутальный дрейф пучка в течение длительности импульса в значительной степени обусловлен большим энергетическим разбросом на выходе ИЭ, где пучок имеет наибольшую частоту когерентных колебаний (колоколообразная форма им-

пульса напряжения на ИЭ приводит к 10-процентному энергетическому разбросу для транспортируемой до выхода ИУ части пучка). Для того чтобы корректор смещал все участки в течение всего импульса, пучок должен находиться в плоскости корректора в пределах углового интервала около $\pi/2$. Угол поворота пучка на участке длиной L при ускорении от γ_n до γ_k таким образом, что $\gamma(z) = \gamma_n + (\gamma_k - \gamma_n)z/L$, определяется следующим выражением:

$$\theta = \frac{eB_z L}{2mC(\gamma_k - \gamma_n)} \ln \frac{\sqrt{\gamma_k^2 - 1} + \gamma_k}{\sqrt{\gamma_n^2 - 1} + \gamma_n}, \quad (1)$$

где e и m — заряд и масса электрона, C — скорость света, B_z — индукция продольного магнитного фокусирующего поля. Из (1) следует, что азимутальный дрейф пучка на выходе ИУ не превышает $\sim \pi/2$, если энергетический разброс на выходе ИЭ меньше $\sim 4\%$, а на выходе ИУ меньше $\sim 2\%$ (при $\gamma_n = 1,6$ и $\gamma_k = 7$).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ НАЛАДКИ ИНЖЕКТОРНОГО УЧАСТКА

Исходя из полученных экспериментальных результатов основной задачей наладки ИУ являлось получение проектных параметров пучка по току и длительности импульса и улучшение монохроматичности пучка для обеспечения возможности использования корректоров при проводке пучка в системе дискретных катушек ускорительных участков.

В рамках наладочных работ на ИУ был заменен ИЭ и его система питания, проведено выравнивание магнитного фокусирующего поля и настройка импульсной системы питания ускоряющих секций.

Новый ИЭ был закреплен в юстировочном приспособлении, обеспечивающем его вращение и сдвиг в горизонтальной и вертикальной плоскостях для вывода пучка на ось. Была восстановлена проектная импульсная система питания ИЭ на основе трансформаторной секции индукторов. В результате этого на ИЭ был сформирован стабильный прямоугольный импульс напряжения с длительностью плоской части ~ 400 нс при неоднородности вершины $\pm 2,5\%$ и напряжении 300 кВ. Для ИЭ была разработана новая электронно-оптическая система с оптикой Пирса на основе прессованного оксидно-никелевого катода диаметром 50 мм. Анод в новом ИЭ был затянута проволоочной сеткой с шириной ячейки $\sim 2,5$ мм. По результатам численного моделирования и экспериментальным данным измерения пульсаций огибающей пучка во второй секции ИУ было оптимизировано распределение магнитного поля в переходной области между ИЭ и первой секцией. Длина переходной области была сокращена до ~ 40 см, магнитоиндукционный датчик заменен более компактным датчиком противотока, а магнитное

поле дисковой торцевой катушки скорректировано магнитными шиммами для получения расчетной кривой магнитного поля. Кроме того, первая фокусирующая катушка секции была запитана от отдельного источника питания.

Путем установки дополнительных катушек в межсекционные промежутки и шиммирования поля отдельных катушек произведено выравнивание магнитного поля на оси ускорителя до уровня $\pm 15\%$ от средней величины поля в секциях. Была проведена юстировка фокусирующих катушек между секциями, позволившая снизить поперечную составляющую магнитного поля на оси ускорителя до $\sim 1\%$ от аксиальной величины поля.

Оптимизация работы тиратронов импульсной системы питания ускоряющих секций и установка диодов снятия перезаряда с формирующих линий обеспечили стабилизацию энергетического спектра пучка во времени на выходе ИУ до уровня разрешающей способности энергоанализатора $\sim 0,5\%$.

В результате проделанных работ на выходе ИУ при энергии 2,9 МэВ был получен прямоугольный импульс тока пучка амплитудой 240 А при длительности плоской части импульса ~ 400 нс и длительности импульса на полувысоте ~ 500 нс. Коэффициент токопрохождения составил около 85%. На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов тока по длине ИУ после его наладки. При изменении энергии электронов и тока пучка для проводки пучка отпала необходимость в трудо-

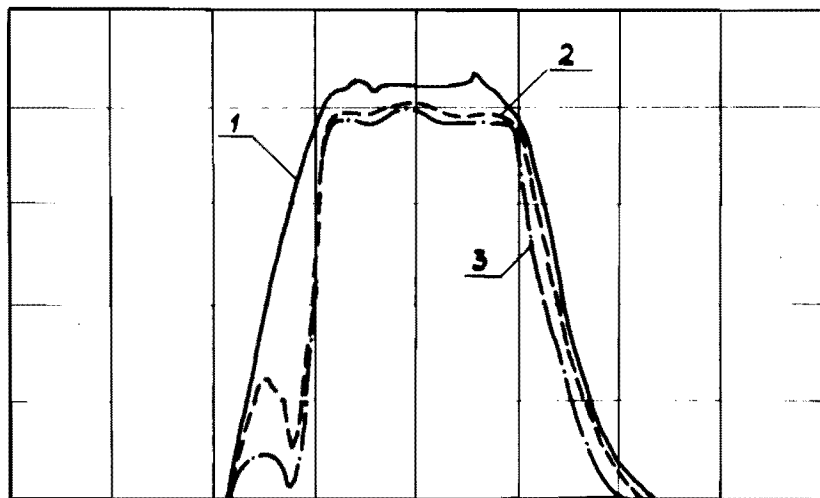


Рис. 6. Осциллограммы импульсов тока пучка по длине инжекторного участка после наладки: 1 — на выходе 2-й секции; 2 — на выходе 8-й секции; 3 — на выходе 11-й секции. Масштаб: по вертикали — 60 А на деление; по горизонтали — 200 нс на деление.

емком подборе токов фокусирующих катушек по всему ускорительному тракту ИУ — достаточно лишь изменить токи трех фокусирующих катушек переходной области и настроить корректоры. Фокусирующее поле по длине ИУ во всех режимах устанавливается однородным (с точностью до $\pm 15\%$), монотонно нарастающим от 0,03 до 0,04 Тл. При отключенных корректорах удается провести только 210 А тока номинальной длительности.

Результаты измерения эмиттанса пучка представлены на рис. 7. Полученные данные свидетельствуют о том, что несмотря на существенное выравнивание магнитного поля наблюдается значительный рост фазового объема пучка по длине ускорительного тракта.

Результаты измерения энергетического спектра показали, что электроны пучка на выходе ИУ имеют энергетический разброс $\sim 9\%$ от $E_{\text{макс}}$ по основанию кривой распределения и $\sim 5\%$ на полувысоте. Ширина мгновенных энергетических спектров в стробируемых промежутках времени длительностью ~ 40 нс на выходе ИУ составила 1,5-2,5% от $E_{\text{макс}}$ по основанию кривой распределения.

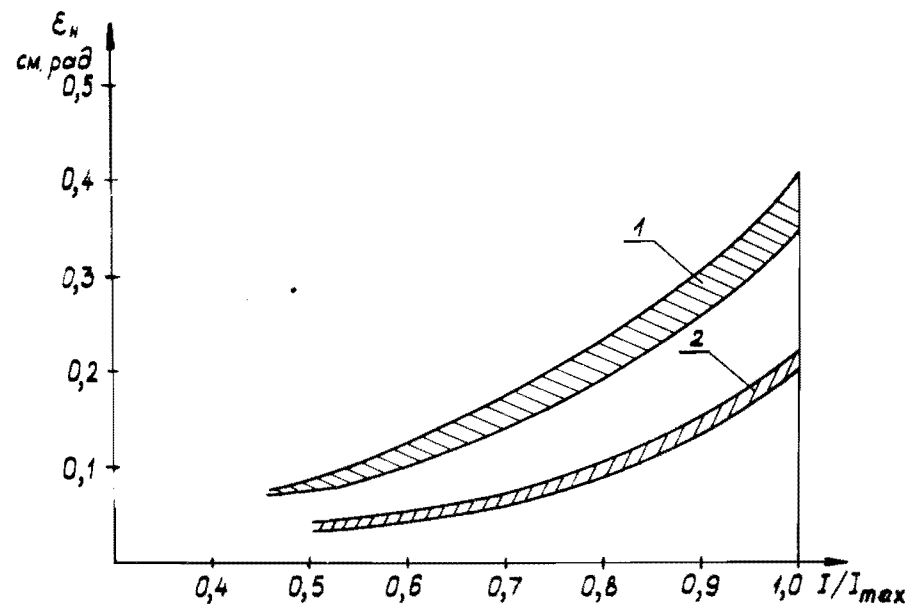


Рис. 7. Зависимость величины нормализованного эмиттанса пучка ϵ_n от заключенной в нем доли тока $I/I_{\text{макс}}$: 1 — область значений ϵ_n для различных участков времени в пределах вершины импульса тока на выходе инжекторного участка при $\sqrt{\gamma^2 - 1} = 6,7$ и $I_{\text{макс}} = 210$ А; 2 — область значений ϵ_n для различных участков времени в пределах вершины импульса тока на выходе источника электронов при $\sqrt{\gamma^2 - 1} = 1,1$ и $I_{\text{макс}} = 140$ А.

Амплитуда когерентных колебаний пучка на выходе ИУ была снижена до ~ 10 мм, а положение пучка в стробируемый момент времени застabilизировано. Азимутальный дрейф пучка в течение плоской части импульса тока на выходе ИУ не превышал $\pi/3$. Фронтальные участки тока пучка смещались по азимуту на углы до $\pi/2$ от положения пучка на вершине импульса тока. Этот результат намного лучше того, что можно получить по формуле (1) при существующем энергетическом разбросе. Объясняется это тем, что в процессе ускорения за счет искажения формы импульсов ускоряющего напряжения при нагрузке пучком соотношение между энергиями электронов в различных участках по длительности импульса постоянно меняется и азимутальное смещение электронов получается меньшим, чем при фиксированном соотношении энергий, принятом при выводе (1). Достигнутые параметры пучка, как показывают расчеты, позволяют начать работы по проводке пучка через ускорительные участки.

Авторы благодарят принимавших участие в наладке систем А.Е.Барановского, О.С.Богданова, А.И.Бредина, В.И.Дряхлова, В.И.Корнева, А.П.Куприянова, В.Г.Житенева, В.Н.Мамыкина и А.Н.Попова; В.С.Кладницкого, П.С.Анцупова, В.Г.Пятаева, С.В.Солодова, В.Н.Клочкова, А.К.Самойлова, В.Б.Заббарова и И.Н.Мартынова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев В.Д., Блохинцев Д.И., Букаев П.В. и др. Препринт ОИЯИ 13-4392, Дубна, 1969.
2. Вахрушин Ю.П. и др. – В сб.: Тезисы докладов 10-го Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц, ХФТИ, Харьков, 1987, с.61.
3. Анцупов П.С. и др. Препринт ОИЯИ Р9-10999, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 мая 1988 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-191	Труды Международного совещания по аналитическим вопросам на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-193	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д1,2-86-688	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Советского "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды II Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мезонов и пионов с веществом. Дубна, 1987.	4 р. 20 к.
Д17-88-95	Труды IV Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1987.	5 р. 20 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, д/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.