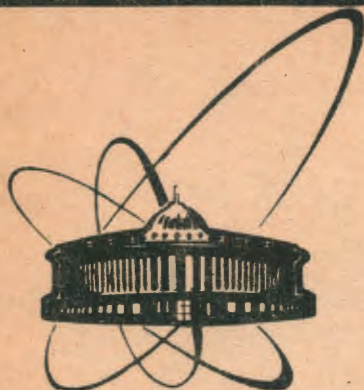


90-355



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

A-64

P9-90-355

В.Д.Ананьев, Ю.П.Вахрушин*, А.А.Волжев*,
М.И.Демский*, В.Б.Заббаров, В.С.Кладницкий,
В.С.Кузнецов*, С.Л.Платонов, А.С.Тихомиров*,
А.С.Томилин*, Д.Е.Трифонов*, В.И.Ульянов*,
В.А.Швец

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО ТРАНСПОРТИРОВКЕ
СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
В СИСТЕМЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ
НА УСКОРИТЕЛЕ ЛИУ-30

*НИИЭФА им. Д.В.Ефремова, Ленинград

1990

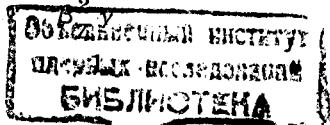
Ускоритель ЛИУ-30 состоит из инжекторного участка (ИУ), в котором пучок ускоряется до энергии 3 МэВ в соленоидальном магнитном поле, и пяти ускорительных участков, каждый из которых дает приращение энергии около 5 МэВ при транспортировке пучка в системе периодической фокусировки (СПФ), образованной короткими соленоидами. На ИУ были получены проектные параметры пучка: амплитуда импульса тока 250 А при энергии 3 МэВ и длительности импульса на полувысоте 500 нс^{1/}. Данная работа посвящена результатам исследований по транспортировке пучка в СПФ.

Первые опыты по проводке пучка в СПФ, рассчитанной на транспортировку ламинарного соосного с ускорительным трактом пучка, окончились неудачно. Через первый ускорительный участок (1УУ) длиной около 40 м удалось провести пучок с током не более 20 А при укорочении длительности импульса до нескольких десятков наносекунд. Для уточнения требований к параметрам СПФ и качеству пучка была проведена серия расчетов динамики пучка в СПФ, в основу которых были положены достигнутые на выходе ИУ параметры пучка: эмиттанс, энергетический спектр, амплитуда когерентных колебаний^{2/}.

Как следует из расчетов и экспериментальных данных, одной из основных причин, приводящих к потерям пучка при его транспортировке по протяженному ускорительному тракту, является смещение центра тяжести пучка относительно оси электропровода, т.е. когерентные колебания (КК).

Когерентные колебания представляют собой прецессию центра тяжести пучка относительно осей фокусирующих катушек. Они возникают из-за несоосной инжекции и нарастают при прохождении смещенным от оси пучком участков с радиальными составляющими электрического и магнитного полей. Наибольшее влияние на рост амплитуды КК оказывают перекосы и несоосности отдельных катушек. Существенную роль в неустойчивости когерентного движения может играть взаимодействие пучка с зарядами и токами изображений. Уравнение движения центра тяжести пучка между катушками СПФ с учетом этого эффекта и при сравнительно малых отклонениях от оси можно записать в виде^{3/}:

$$r'' = \frac{2I_r}{I_0 \beta_z^3 \gamma R_E^2} (f_E - \beta_z^2 f_H \frac{R_E^2}{R_H^2}) - \frac{\gamma r'}{R_E^2}, \quad (1)$$



где I — ток пучка; γ и β_z — релятивистский фактор и относительная скорость электронов; f_E , f_H , R_E и R_H — коэффициенты и радиусы экранирования электрического и магнитного поля; $I_0 \cong 17$ кА. В ЛИУ-30 проектом предусмотрена возможность установки как секционированных металлокерамических ускорительных трубок, так и трубок с резистивным покрытием. Эти трубки различаются по степени экранирования электрических и магнитных полей. В трубках с резистивным покрытием заряды индуцируются в электропроводящем покрытии внутренней поверхности трубок, предназначенном для стекания заряда при попадании пучка на стенку, а токи — в элементах корпуса индукторов. При этом $f_E \cong f_H \cong 1$, $R_H > R_E$ и выражение в скобках уравнения (1) для секции ЛИУ-30 составляет $\sim 0,72$.

В секционированной трубке диэлектрическая поверхность защищена от пучка металлическими электродами, имеющими контакт с внутренней частью обмотки индуктора. При этом электрическое и магнитное поле в значительной степени экранируется электродами трубки. Для трубки ЛИУ-30 коэффициенты экранирования f_E и f_H , определенные по формулам^{3/}, равны соответственно 0,99 и 0,75, а выражение в скобках уравнения (1) составляет $\sim 0,27$. Исходя из уравнения движения центра тяжести пучка (1), можно сделать вывод, что в ускорителе ЛИУ-30 при наличии секционированных ускорительных трубок ток I , приводящий к заданному предельному смещению пучка от оси, будет в $\sim 2,7$ раза больше, чем для резистивных трубок, поэтому СПФ рассчитывалась на транспортировку пучка в секционированных трубках.

Оптимизация СПФ велась по минимальному росту амплитуды когерентных колебаний в полях, обеспечивающих огибающую пучка с максимальным радиусом 1,75 см (радиус электропровода 3,75 см). Когерентное движение исследовалось на ЭВМ методом статистического моделирования по специально разработанным в НИИЭФА программам с учетом притяжения пучка к стенкам. Максимальный уровень перекосов осей линз принимался порядка 0,02 рад, а несоосностей — 1 мм. Использовался гауссов закон распределения случайных величин. Огибающая пучка рассчитывалась как в параксиальном приближении, так и по разработанным в НИИЭФА программам^{4/}, учитывающим внутреннюю структуру пучка. Результаты оптимизации представлены на рис.1 и 2. На рис.1 показано изменение расстояния между импульсными линзами по длине ускорительных участков, а на рис.2 — поля в них. Видно, что на ускорительных участках требуется около 120 линз, поля в которых меняются от 1 до 3,8 кГс.

В результате статистического моделирования процесса роста амплитуды когерентных колебаний в данной СПФ было получено, что отклонение в 1,5 см от оси достигается в среднем на расстоянии порядка 11 м,

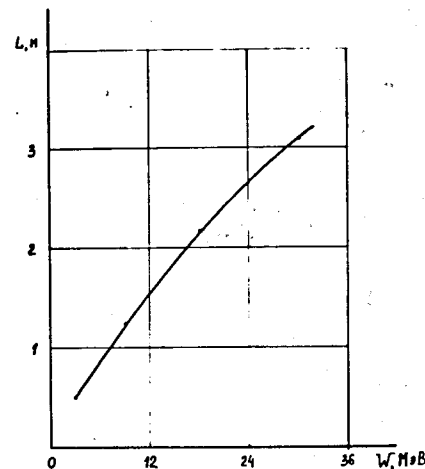
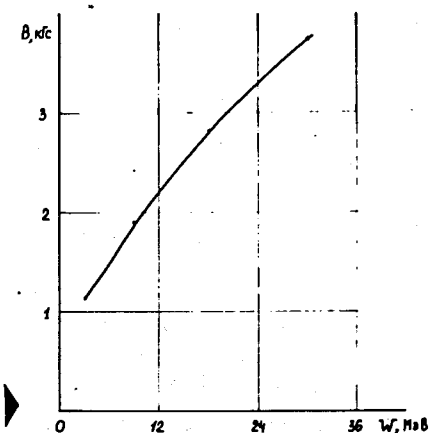


Рис.1. Расстояния между линзами.

Рис.2. Индукция фокусирующего магнитного поля в линзах с протяженностью поля на полувысоте кривой распределения 10 см.



что лишь в 2 раза меньше, чем для аналогичных расчетов по транспортировке пучка в непрерывном поле, поэтому фокусирующая система с непрерывным полем не имеет принципиального преимущества перед дискретной в плане удержания когерентных колебаний в канале ЛИУ-30. В обоих случаях для проводки пучка требуется установка корректоров положения пучка.

Изменение энергии электронов в течение импульса приводит к изменению периодов колебательных процессов в пучке и проявляется в изменении фазы когерентных колебаний электронов в пучке и колебаний огибающей пучка в плоскости наблюдения. Изменение фазы огибающей приводит к изменению максимального радиуса пучка в СПФ, так как участок согласования между фокусирующей системой с соленоидальным полем и СПФ настраивается по минимуму максимального радиуса пучка в СПФ для определенной фазы огибающей на входе участка согласования. Как показывают расчеты, для первых двух ускорительных участков за счет этого эффекта максимальная амплитуда огибающей в СПФ может возрасти в отдельных временных слоях импульса до 1,6 номинального значения.

Изменение фазы когерентных колебаний проявляется в азимутальном дрейфе пучка в течение импульса в плоскости наблюдения. Если угол поворота пучка превышает $2\pi/3$, то при использовании корректоров отдельные участки пучка по длительности импульса будут откло-

няться не к оси, а от нее, что может привести к их оседанию на стенках тракта. Так как наибольшее отличие по энергии электронов наблюдается в начале и конце импульса, когда меняется нагрузка у импульсных генераторов ускоряющей системы ЛИУ, то эффекты, связанные с изменением фазы колебаний, будут приводить прежде всего к укорочению длительности импульса.

Изменение соотношения между энергией электронов в отдельных временных слоях импульса по длине ускорителя затрудняет определение допустимого энергетического разброса в пучке ^{1/1}. Рассмотренные эффекты, обусловленные энергетическим разбросом электронов, можно охарактеризовать ростом эффективного (интегрального за время импульса) поперечного фазового объема, равного площади, занимаемой представляющими точками всех за время импульса частиц пучка на фазовой плоскости. Акцептанс фокусирующей системы ускорительных участков должен быть больше эффективного фазового объема. Как показывают расчеты динамики пучка в разработанной СПФ, выполненные с учетом изменения фазы огибающей и когерентных колебаний при расстановке корректоров с шагом около 5 м, нормализованный акцептанс СПФ возрастает по длине 1УУ от 0,6 см·рад до 0,8 см·рад, а на конце ускорителя достигает 1,0 см·рад.

Еще одним эффектом, затрудняющим проводку пучка в СПФ, является рост поперечного фазового объема, вызванный абберациями фокусирующих катушек. Как показывают расчеты, при соосном движении пучка радиальная неоднородность магнитного фокусирующего поля вызывает рост поперечного фазового объема по длине 1УУ на 50-60%. Несоосное движение пучка можно приближенно отразить в расчетах увеличением радиуса пучка. В этом случае при смещениях пучка от оси ~1 см фазовый объем возрастает по длине 1УУ примерно в два раза, так как пучок проходит фокусирующие участки с большей, чем в соосном случае, радиальной неоднородностью. Исходя из этого эффективный поперечный фазовый объем пучка на выходе ИУ должен быть примерно в два раза меньше нормализованного акцептанса ускорительного тракта на выходе 1УУ, то есть около 0,4 см·рад.

Для совмещения пучка с осью были разработаны станции коррекции положения пучка, состоящие из двух последовательно установленных корректоров, совмещенных с фокусирующими катушками, и двух датчиков положения пучка. Такая система в отличие от одного корректора позволяет не только уменьшить угол наклона оси пучка к оси ускорителя, но и по возможности совместить эти оси. Как показали экспериментальные исследования разработанной станции коррекции положения пучка, подбором токов корректоров можно существенно снизить эффективный поперечный фазовый объем пучка.

Исследования по транспортировке пучка в СПФ 1УУ были начаты до завершения всех запланированных мероприятий по модернизации электронно-оптической системы (ЭОС) и улучшению качества пучка на выходе ИУ. Фокусирующие катушки, установленные в соответствии с рис.1 как в секциях, так и в промежутках между ними, были отъюстированы с точностью не хуже 0,7%. Электропровод образован первоначально изготовленными ускорительными трубками с резистивным покрытием. Коррекция положения пучка осуществлялась при помощи одиночных корректоров, установленных совместно с датчиками положения пучка. Пучок с током 200-250 А имел мгновенные (в отдельных временных слоях длительностью ~40 нс) значения фазового объема 0,35-0,4 см·рад, а эффективный фазовый объем достигал 0,6-0,65 см·рад.

Сравнивая требуемые по расчету и имеющиеся параметры пучка и тракта, можно предположить возможность проводки в такой ЭОС укороченного по длительности (с фазовым объемом менее 0,4 см·рад) импульса пучка с амплитудой тока около 100 А (учитывая эффект затягивания пучка на стенки). Однако, как показали экспериментальные исследования, проводка пучка с укороченной длительностью сопровождается искажением формы импульсов ускоряющего напряжения индукционной системы, а следовательно, ростом энергетического разброса в пучке. Этот процесс быстро нарастает и приводит к развалу пучка вдоль тракта. Пучок с током около 100 А удавалось провести на расстояние не более ~20 м (10 ускорительных секций).

Для получения пучка с необходимым по расчету фазовым объемом на выходе источника электронов, в месте первого после кроссовера максимального радиуса огибающей, был установлен коллиматор диаметром 32 мм, вырезающий около 40% тока источника электронов. Пучок за коллиматором при токе около 70 А имел мгновенный фа-

зовый объем $V_x = \frac{1}{\pi} \sqrt{y^2 - 1} \int dx dx'$, совпадающий с эффективным и равный ~0,15 см·рад. Уменьшение тока и фазового объема пучка привело к уменьшению уровня когерентных колебаний и согласованного радиуса пучка на ИУ, а это, в свою очередь, способствовало снижению эффективного фазового объема и уменьшению роста по длине ИУ мгновенных значений фазового объема (при токе 200-250 А согласованный радиус пучка был в ~2 раза больше и мгновенный фазовый объем возрастал с 0,2 см·рад до 0,35-0,4 см·рад ^{1/1}). В результате на выходе ИУ был получен пучок с эффективным фазовым объемом менее 0,3 см·рад при мгновенных значениях около 0,2 см·рад, который был проведен со сравнительно небольшими потерями через 1УУ. На рис.3 приведены осциллограммы импульсов тока, а на рис.4-6 — кривые зависимости фазового объема пучка от заключенной в нем доли тока для отдельных

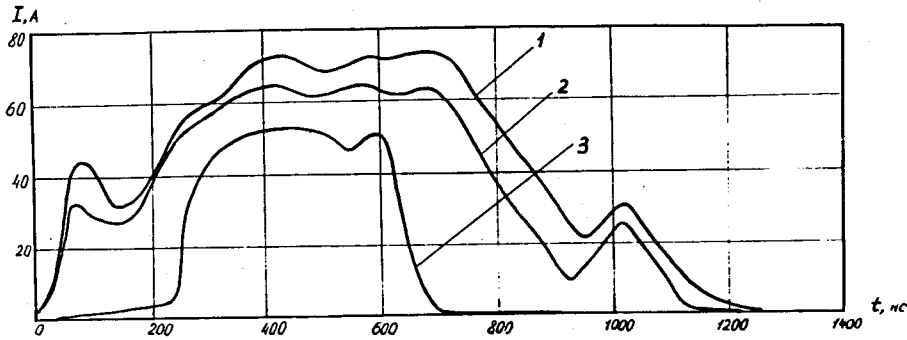


Рис.3. Импульсы тока пучка по длине ускорителя: 1 — на выходе первой секции инжекторного участка; 2 — на выходе инжекторного участка; 3 — на выходе первого ускорительного участка.

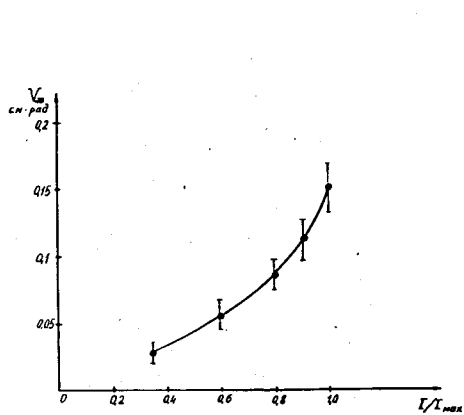


Рис.4. Зависимость поперечного фазового объема пучка от заключенной в нем доли тока на выходе первой секции инжекторного участка.

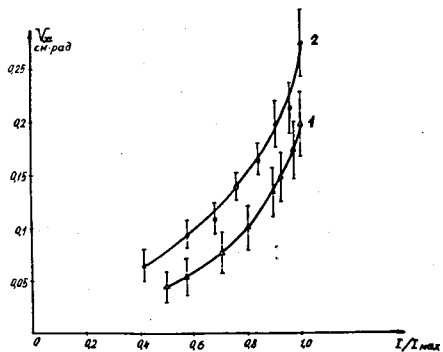


Рис.6. Зависимость поперечного фазового объема пучка от заключенной в нем доли тока на выходе первого ускорительного участка: 1 — фазовый объем временных слоев импульса длительностью 40 нс; 2 — эффективный фазовый объем.

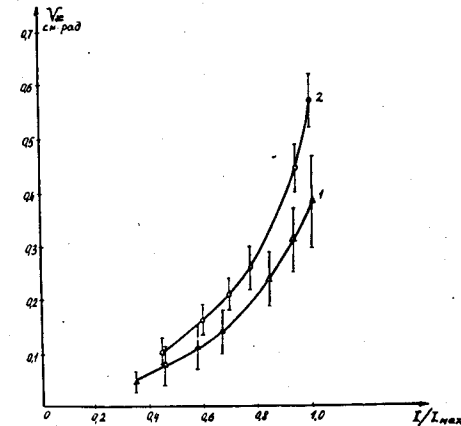


Рис.5. Зависимость поперечного фазового объема пучка от заключенной в нем доли тока на выходе инжекторного участка: 1 — фазовый объем временных слоев импульса длительностью 40 нс; 2 — эффективный (интегральный за время импульса) фазовый объем.

участков по длине ускорителя. Измерения фазового объема проводились при помощи телевизионной системы со стробированием изображения импульсами длительностью ~ 40 нс^{1/}.

Как видно из приведенных экспериментальных данных, эффективный фазовый объем на конце 1УУ достигает $\sim 0,6$ см·рад. Учитывая, что часть пучка на длине 1УУ все же теряется, можно заключить, что нормализованный аксептанс СПФ 1УУ имеет ту же величину.

Как мгновенный, так и эффективный фазовый объем возрастают по длине 1УУ (с учетом наличия потерь) более чем в 2 раза. Это согласуется с результатами численного моделирования эволюции фазового объема в СПФ, так как уровень когерентных колебаний на 1УУ достигал $\sim 1,5$ см (двухкратный рост фазового объема по расчету был при когерентных колебаниях ~ 1 см). Введение станций совмещения пучка с осью, установленных с шагом около 5 м, как показывают расчеты, позволит снизить уровень когерентных колебаний до ~ 1 см.

Как следует из уравнения (1), установка секционированных ускорительных трубок позволит при том же уровне КК поднять уровень тока в $\sim 2,7$ раза, то есть до ~ 150 А.

Таким образом, полученные расчетные и экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что пучок с близкими к проектным значениям тока может быть проведен в разработанной СПФ с секционированными ускорительными трубками и станциями совмещения пучка с осью при значениях эффективного поперечного фазового объема менее 0,3 см·рад. Пучок такого качества можно получить за счет модернизации ЭОС источника электронов и выравнивания распределения фокусирующего магнитного поля по длине ИУ. ЭОС источника электронов, формирующая пучок с поперечным фазовым объемом $\sim 0,125$ см·рад при токе 280 А на базе катода диаметром 80 мм, уже разработана и исследована^{5/}.

Как показали исследования по транспортировке пучка на 1УУ, одной из проблем является вывод ускорителя на режим. Для СПФ потребуется компьютерное управление полями корректоров и линз на участке согласования ИУ и 1УУ. В этом плане фокусировка непрерывным магнитным полем предпочтительней, поскольку управлять надо только корректорами, а их число сокращается в два раза, но при этом возрастают требования к энергетическому разбросу в пучке и для их снижения целесообразно увеличить темп ускорения^{6/}.

Авторы благодарят принимавших участие в наладке отдельных систем и узлов ЛИУ-30 А.Е.Барановского, О.С.Богданова, В.Г.Житенева, С.Н.Жесткова, С.Г.Зыкина, Ю.А.Казанкина, А.П.Куприянова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вахрушин Ю.П. и др. — Сообщение ОИЯИ Р9-88-383, Дубна, 1988.
2. Вахрушин Ю.П., Кузнецов В.С., Тихомиров А.С. — В кн.: Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-89-52, Дубна, 1989, т.1, с.445.
3. Алексахин Ю.А. — Препринт ОИЯИ Р9-87-196, Дубна, 1987.
4. Тихомиров А.С. — Препринт НИИЭФА П-В-0737, ЦНИИатоминформ, М., 1986.
5. Вахрушин Ю.П., Демский М.И., Тихомиров А.С. — В сб.: Тезисы докладов 6-го Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. ЦНИИатоминформ, М., 1988, с.69.
6. Швец В.А. — Препринт ОИЯИ Р9-89-355, Дубна, 1989.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 мая 1990 года.

Ананьев В.Д. и др.
Результаты исследований по транспортировке сильноточного электронного пучка в системе периодической фокусировки на ускорителе ЛИУ-30

Р9-90-355

В линейном индукционном ускорителе на 30 МэВ (ЛИУ-30), рассчитанном на получение пучка электронов с током 250 А в импульсе длительностью 250 нс в инжекторном участке с энергией 3 МэВ в соленоидальном магнитном поле были получены проектные параметры. Пять ускорительных участков (УУ), каждый из которых рассчитан на приращение энергии 5,5 МэВ, предусматривают транспортировку пучка в системе дискретной (периодической) фокусировки (СПФ). Оптимизация СПФ проведена по минимальному росту амплитуды когерентных колебаний в полях от 1 до 3,8 кГц по мере продвижения от 1УУ к 5УУ с изменением шага расстановки от 0,5 до 1,2 м при количестве коротких соленоидов 120, причем показано, что в секционированной металлокерамической трубке (СМКТ) можно транспортировать ток в 2,7 раза больший, чем в резистивной. Пучок с током 200-250 А имел мгновенные значения фазового объема $0,35 \div 0,4$ см·рад, а эффективный фазовый объем достигал $0,6 \div 0,65$ см·рад. С коллиматором, вырезающим около 4% тока источника электронов (ИЭ), ток источника составлял 70 А и имел фазовый объем 0,15 см·рад. Однако в конце 1УУ эффективный фазовый объем составил также 0,6 см·рад, что, видимо, совпадает с акцептансом СПФ 1УУ.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1990

Перевод И.В.Кронштадтовой

Anan'ev V.D. et al.
Investigation Results on the Transport of High-Current Electron Beam in the System of Periodic Focusing at the LIU-30 Accelerator

Р9-90-355

Specifications were obtained at the LIU-30 30 MeV linear induction accelerator designed for the production of electron beam with the current of 250 A and pulse duration 250 ns in injection section with the energy of 3 MeV in solenoidal magnetic field. 5 acceleration sections (AS), each designed for the energy increase of 5,5 MeV, specify beam transport in the system of periodic focusing (SPF). The SPF optimization is performed for the minimum growth of the coherent oscillations amplitude in the range from 1 to 3,8 KGs while passing from the first AS to the fifth one, changing the distance between them from 5,5 to 1,2 m. The number of short solenoids was 120. It is worth noting that in a sectionized metal-ceramic tube (SMCT) it is possible to transport the current two times higher than in a resistive tube. A beam with the current of 200-250 A had instant emittance of $0,35 \div 0,4$ cm·rad, effective emittance reached $0,6 \div 0,65$ cm·rad. With the collimator which transmitted about 40% of the electron source current the source current was 70 A and had emittance 0,15 cm·rad. However, in the end of the first AS effective emittance was also 0,6 cm·rad, which may coincide with the SPF acceptance of the first AS.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1990