

Рис. 2. Осциллограмма сигнала с магнитных датчиков.

инжекции и квазибетатронного режима ток измеряется датчиком с пермалловым сердечником. Датчик без заметных искажений воспроизводит импульсы длительностью до 10 мксек. Измерение тока сгруппированного пучка в процессе ускорения проводится при помощи ферритового датчика, настроенного на частоту прохождения сгустков 36,5 МГц. Обмотки датчиков соединены последовательно; сигналы с них усиливаются предварительным усилителем и подаются в центральную пульттовую на осциллограф, где можно наблюдать ток в любой момент времени от инжекции до конца

ускорения. На рис. 2 приведена осциллограмма сигнала с магнитных датчиков, которая показывает, что заметных потерь электронов в процессе ускорения не наблюдается.

При выведенном из микротрона токе около 20 ма в камеру вводилось порядка 10—12 ма. При этом ток, накопленный в квазибетатронном режиме, составлял порядка 100 ма. Интенсивность пучка электронов в конце ускорения была равна $1,2 \cdot 10^{10}$ частиц в импульсе.

Указанная интенсивность не является предельной для рассматриваемого синхротрона. Микротрон работает в сравнительно легком режиме; амплитуда и длительность импульса тока микротрона могут быть увеличены. Имеются также другие резервы увеличения ускоряемого заряда.

В настоящее время заканчивается изготовление новых резонаторов; ведутся работы по переводу системы питания электромагнита в номинальный режим, изготовлен новый микротрон на более высокую энергию и проводятся другие работы с целью получения на ускорителе проектных параметров.

Поступила в Редакцию 1/VIII 1966 г.

Линейный индукционный ускоритель

А. И. АНАЦКИЙ, О. С. БОГДАНОВ, П. В. БУКАЕВ, Ю. П. ВАХРУШИН, И. Ф. МАЛЫШЕВ,
Г. А. НАЛИВАЙКО, А. И. ПАВЛОВ, В. А. СУСЛОВ, Е. П. ХАЛЬЧИЦКИЙ

УДК 621.384.622

Описаны принцип действия и конструкция высокоэнергетического линейного индукционного ускорителя электронов на энергию 3 Мэв и ток в импульсе до 200 а. Приведены результаты, полученные на одной секции этого ускорителя. Ток электронов составляет 180 а в импульсе при энергии 485 кэв; длительность импульса на уровне 0,95—0,35 мксек.

Создание ускорителей электронов с током пучка в сотни и тысячи ампер дает возможность использовать энергию, запасенную в пучке ускоренных электронов. Такие ускорители позволяют проводить исследования по созданию и удержанию горячей плазмы [1], а также позволяют проводить эксперименты по исследованию новых методов ускорения [2]. Для этих работ требуется релятивистский электронный пучок значительной протяженности с равномерной плотностью частиц по всей его длине. Такой пучок может быть получен индукционным методом ускорения, предложенным Буверсом в 1923 г. [3]. Этот метод позволяет создать

ускоритель, обладающий достоинствами волноводных линейных электронных ускорителей, в частности простотой ввода и вывода пучка, увеличением энергии путем наращивания числа идентичных секций. Помимо этого, при видеоимпульсном режиме работы ускорителя существенно упрощается фокусировка пучка и обеспечивается захват в режим ускорения практически всех частиц с любой энергией инжекции.

В 1962 г. в Научно-исследовательском институте электро-физической аппаратуры (НИИЭФА им. Д. В. Ефремова) был спроектирован линейный индукционный ускоритель (ЛИУ-3000), рассчитанный на энергию 3 Мэв и ток в импульсе до 200 а. В 1963 г. была изготовлена и налажена первая секция этого ускорителя. Опыт изготовления и наладки первой секции позволил в значительной степени преодолеть технологические трудности производства и уточнить особенности работы ускорителя. Накопленный опыт позволил приступить к изготовлению всего комплекса оборудования.

В настоящее время ведутся монтажно-наладочные работы. Запуск этого ускорителя даст возможность полнее выявить все его особенности и преимущества и откроет пути для широкого использования сильноточного индукционного ускорителя для различных целей.

Принцип действия ускорителя

Принцип действия линейного индукционного ускорителя основан на использовании для ускорения электронов вихревого электрического поля, возбуждаемого в системе. Последняя состоит из нескольких кольцеобразных трансформаторов (рис. 1).

Очевидно, что при одновременном изменении магнитного потока в сердечниках трансформаторов (индукторов) на оси системы возбуждается вихревое электрическое поле:

$$E = -\frac{n}{l} Q \frac{dB}{dt}, \quad (1)$$

где E — напряженность вихревого поля; n — число индукторов в системе; l — длина системы; Q — сечение сердечника индуктора; dB/dt — скорость изменения индукции в сердечнике индуктора. Для получения релятивистского пучка электронов с равномерной по его длине плотностью заряда необходимо обеспечить линейное изменение индукции во времени. В этом случае выражение (1) имеет вид

$$E = -\frac{n}{l} Q \frac{\Delta B}{\tau_{\text{и}}}, \quad (2)$$

где ΔB — приращение индукции; $\tau_{\text{и}}$ — время нарастания индукции. Энергия, которую приобретает электрон в такой системе, составит

$$W = e \int_0^l E dl = enQ \frac{\Delta B}{\tau_{\text{и}}}, \quad (3)$$

где e — заряд электрона. Условие постоянства скорости изменения индукции может быть выполнено при питании первичной обмотки индуктора напряжением прямоугольной формы с длительностью импульса $\tau_{\text{и}}$.

Для того чтобы получить напряженность

ускоряющего поля в сотни кв/м при разумных размерах ускорителя, величина $\Delta B/\tau_{\text{и}}$ должна составлять $10^6 - 10^7 \text{ тл/сек}$, что предъявляет высокие требования к материалу сердечников и коммутирующим устройствам.

Геометрические размеры ускорительной системы выбираются по заданной неоднородности энергии частиц на выходе $\Delta W/W_{\text{к}}$ в предположении, что частицы ускоряются без изменения их радиальной координаты

$$\frac{R}{l} \leq 4 \left(\frac{R}{r} \right)^2 \frac{\Delta W}{W_{\text{к}}}, \quad (4)$$

где R — средний радиус индуктора; r — радиус пучка электронов.

Максимально возможная величина тока ускоряемых электронов в данном ускорителе при наличии фокусировки, достаточной для компенсации расталкивающего действия сил пространственного заряда, определяется в основном мощностью коммутирующего элемента в первичной цепи индуктора и в настоящее время может быть доведена до 1000 а/имп , что недостижимо в ускорителях других типов. Это является одним из основных достоинств линейного индукционного ускорителя.

Конструкция ускорителя

Схема линейного индукционного ускорителя показана на рис. 2. Ускоритель состоит из ряда ускорительных секций (рис. 3, а, б). Каждая секция состоит из 12 индукторов. Они уплотняются при помощи резиновых прокладок таким образом, что внутри секции образуется герметичная полость, в которой может быть создан вакуум $5 \cdot 10^{-6} \text{ торр}$. Такая конструкция ускорительной секции дает возможность отказаться от специальной вакуумной трубки. Отдельные секции при помощи специальных патрубков соединяются попарно в блоки. В промежутках между блоками устанавливаются агрегаты откачки и устройства, предназначенные для наблюдения за пучком. Поскольку в период разработки ускорителя не было достаточно данных об эксплуатационной надежности работы секции в течение длительного периода времени, сочли необходимым предусмотреть возможность установки внутри секции вакуумной трубки, что, очевидно, уменьшит апертуру ускорителя.

Схема индуктора показана на рис. 4. Сердечник выполнен из ленты сплава марки 50НП толщиной $0,02 \text{ мм}$. Сердечник наматывается на специальном станке, причем одновременно

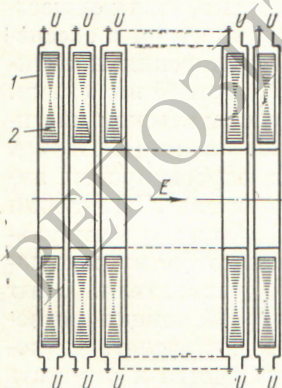
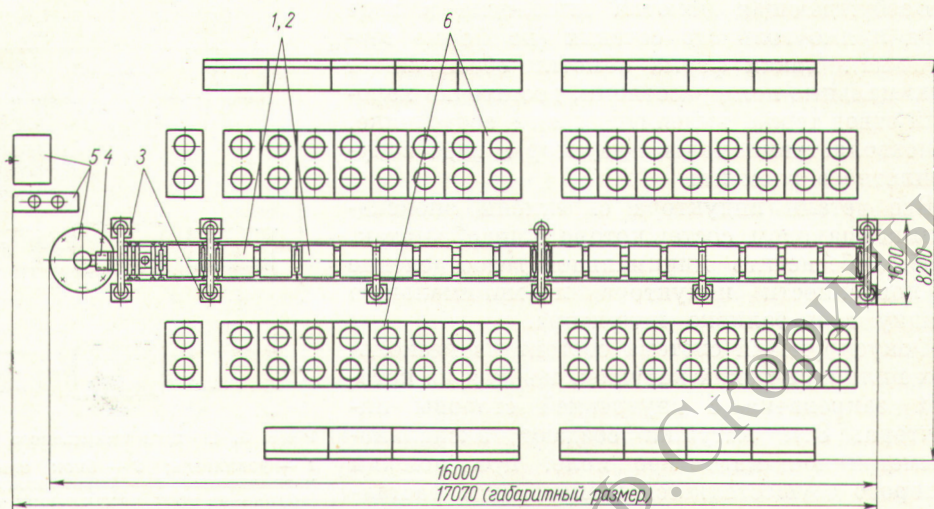


Рис. 1. Ускорительная система:

1 — возбуждающая обмотка; 2 — сердечник индуктора.

Р и с. 2. Схема размещения основного оборудования:

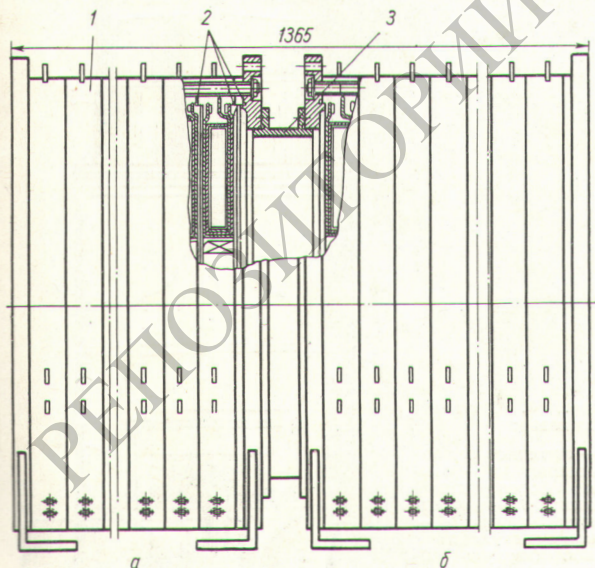
1, 2 — ускорительные секции с фокусирующей системой; 3 — вакуумные насосы; 4 — электронная пушка; 5 — система импульсного питания электронной пушки (разрядник, формирующая линия, импульсный трансформатор); 6 — система импульсного питания ускорительных секций



с намоткой методом катафореза наносится изоляция из окиси магния. После намотки сердечник отжигается по специальной программе в вакуумной печи при максимальной температуре $1150 \pm 20^\circ \text{C}$. Изготовленные таким образом сердечники имеют следующие характеристики:

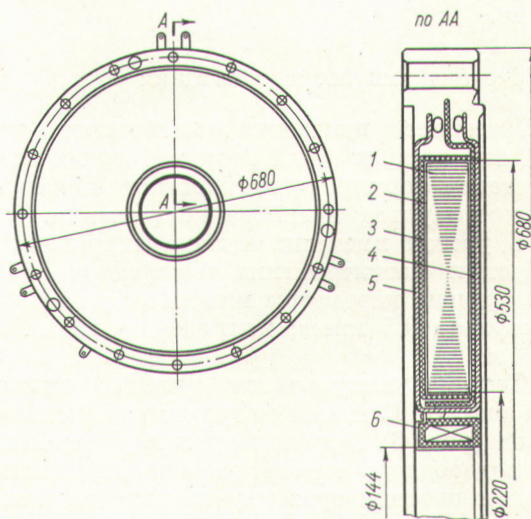
коэффициент заполнения . . .	68—70%
индукция насыщения	1,45 тл
импульсное приращение индукции (с перемангничиванием)	1,8 тл

После отжига сердечник помещается в изоляционные шайбы, выполненные из стеклослюденита. В промежуток между шайбами и сердечником заливается синтетический каучук. Стыки между шайбами заделываются эпоксидным компаундом. Изоляционные шайбы и слой каучука обеспечивают необходимую электрическую изоляцию сердечника от возбуждающей обмотки, а также предохраняют его от механических и тепловых напряжений, что способствует сохранению магнитных характеристик в процессе изготовления, транспортировки и эксплуатации индуктора.



Р и с. 3. Ускорительные секции:

1 — индуктор; 2 — вакуумное уплотнение; 3 — соединительный патрубок.



Р и с. 4. Индуктор:

1 — сердечник; 2 — синтетический каучук; 3, 4 — изоляционные шайбы; 5 — возбуждающая обмотка; 6 — фокусирующая катушка.

Возбуждающая обмотка выполнена в виде тора прямоугольного сечения (по форме сердечника). Такая форма обмотки обеспечивает минимальные поля рассеяния, достаточно хороший отвод тепла, выделяющегося в сердечнике, и позволяет выполнить индуктор в виде вакуумплотного элемента.

Все детали индуктора скреплены эпоксидным компаундом, состав которого подобран так, чтобы обеспечить минимальное газоотделение с поверхности индуктора и минимальную усадку при заливке индуктора.

Фокусирующая система состоит из нескольких цилиндрических катушек, каждая из которых закреплена с внутренней стороны индуктора. Эти катушки создают аксиально-симметричное магнитное поле, при помощи которого осуществляется компенсация расталкивающего действия сил пространственного заряда пучка. Величина поля взята из условия существования бриллюэновского потока; в данном случае при диаметре пучка ~ 3 см величина поля должна быть равна $28\,000$ а/м.

Вакуумная система не отличается от обычных систем, принятых в ускорительной технике. Она позволяет поддерживать вакуум, равный $(5 \div 7) \cdot 10^{-7}$ торр в области электронной пушки и $5 \cdot 10^{-6}$ торр в ускорительных секциях.

В качестве электронной пушки используется пушка серийного клистрона. Электронный пучок на выходе из пушки имеет следующие параметры: ток 200 а; энергия 300 кэв; диаметр 3 см.

Система импульсного питания

Линейное изменение магнитного потока в сердечниках индукторов осуществляется системой формирования короткого прямоугольного импульса высокого напряжения.

С учетом имеющихся коммутирующих приборов и магнитомягких материалов выбраны следующие параметры импульса: длительность импульса $0,5$ мксек; напряжение на нагрузке 15 кв.

Система импульсного питания приведена на рис. 5. Главный модулятор коаксиального типа (рис. 6) состоит из формирующей линии и водородного тиратрона. Он служит источником питания трех параллельно включенных индукторов. Общее число модуляторов 68. Вследствие нелинейного изменения нагрузки в течение импульса используется гиперболическая формирующая линия [4] с одинаковой

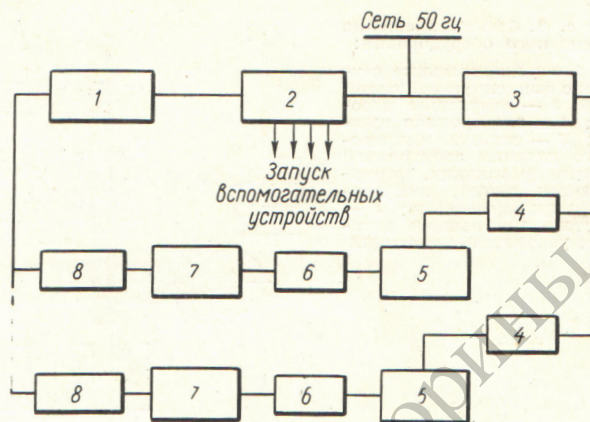


Рис. 5. Система импульсного питания индукторов:

1 — усилитель; 2 — блок синхронизации; 3 — блок размагничивания; 4 — фильтр импульсной защиты; 5 — нагрузка (группа из трех индукторов); 6 — датчики измерений (пояс Роговского и делитель напряжения); 7 — главные модуляторы; 8 — подмодуляторы.

емкостью звеньев, обеспечивающая прямоугольную форму импульса на индукторах. Формирующая линия состоит из восьми-девяти звеньев. Каждое звено набирается из 28 керамических конденсаторов; емкость звена около 5000 пф.

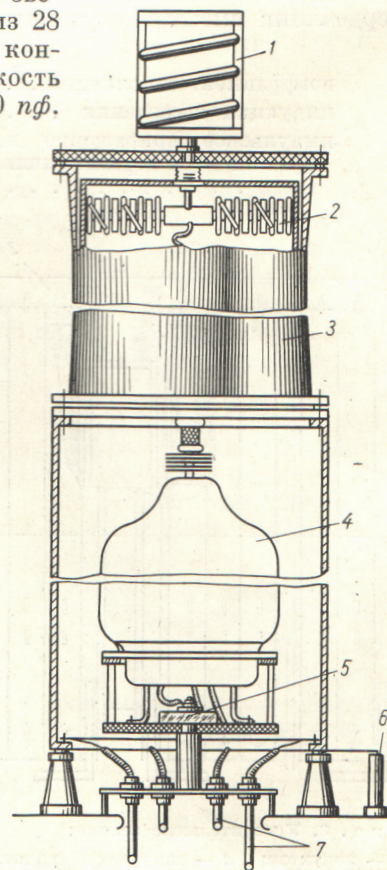


Рис. 6. Главный модулятор:

1 — зарядное сопротивление; 2 — секция формирующей линии; 3 — формирующая линия; 4 — коммутирующий прибор (импульсный тиратрон); 5 — пояс Роговского; 6 — делитель импульсного напряжения; 7 — коаксиальные кабели.

Формирующие линии питаются от выпрямителя (35 кв) через зарядные сопротивления.

От модулятора к каждому индуктору передается электромагнитная энергия тремя коаксиальными кабелями, которые подключаются в трех точках, расположенных под углом 120° . Мощность системы питания обеспечивает работу линейного индукционного ускорителя с частотой до 50 гц. Блок синхронизации имеет пять выходных каналов: для запуска главных модуляторов, инжектора, осциллографа и других систем установки. Все каналы общим входом электрически связаны с выбираемой фазой напряжения питающей сети. Импульс каждого канала может смещаться относительно других каналов посредством регулируемых линий задержки. Размагничивание индукторов осуществляется током промышленной частоты. В цепи размагничивания включен высоковольтный фильтр импульсной защиты. Импульсы тока и напряжение измеряются двухлучевым осциллографом, сигналы на который подаются от пояса Роговского и делителя импульсного напряжения.

Результаты исследования ускорительной секции

Расчетные данные, полученные при разработке ускорителя, проверены при работе инжекторной части ускорителя (рис. 7).

На фото (справа налево) видны: электронная пушка в изоляционном масляном баке, вакуумный патрубок, четыре фокусирующие линзы и одна ускорительная секция, состоящая из 12 индукторов.

После наладки инжекторной части для определения ее работоспособности был осуществлен непрерывный прогон в номинальном режиме в течение 75 ч. Наладка установки заключалась в вакуумной тренировке объема, в получении расчетного значения тока пучка, в подборе величины тока в фокусирующей системе с целью достижения наилучшего прохождения пучка, в подборе элементов формирующей линии для получения прямоугольного импульса напряжения, в обеспечении синхронной работы модуляторов, пушки и измерительных устройств. Испытывалась секция, собранная с вакуумной трубкой. Наряду с этим были изучены вакуумные параметры секции без ускорительной трубки.

С целью наилучшего использования магнитных свойств сердечников обращалось внимание на то, чтобы группы из трех индукторов, питающиеся от одного модулятора, имели идентичные импульсные вольт-амперные характеристики. Для получения неоднородности плоской части импульса напряжения, не превышающей 5%, оказалось необходимым подогнать волновые сопротивления ячеек форми-

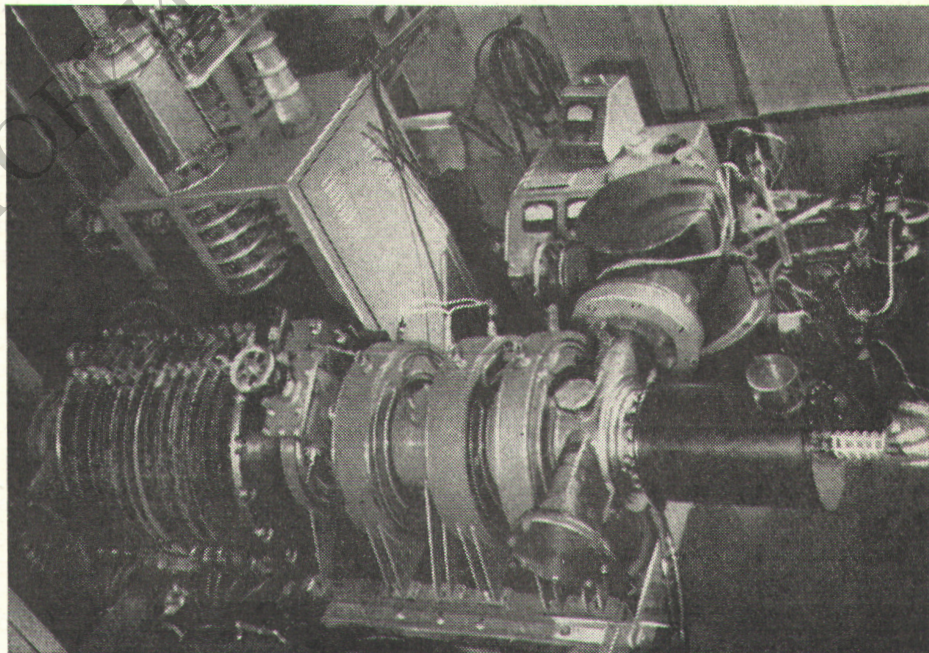


Рис. 7. Инжекторная часть.

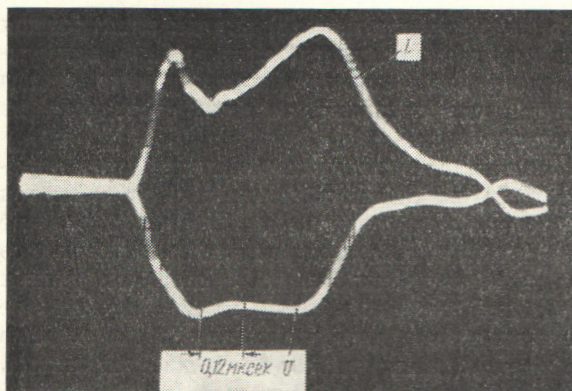


Рис. 8. Осциллограмма импульсов тока (i) и напряжения (U), полученная для одной группы индукторов.

рующей линии путем изменения индуктивностей. На рис. 8 приведена осциллограмма напряжения U и тока i одной группы индукторов.

В среднем длительность переднего фронта импульса составляет 0,18 мксек, длительность плоской части 0,35 мксек, амплитуда напряжения 15,5 кв. Подстройкой линий задержки в каналах запуска каждого подмодулятора была достигнута одновременность срабатывания модуляторов (не хуже 0,05 мксек).

На рис. 9 приведена зависимость тока эмиссии катода от напряжения U_a . Опыты под-

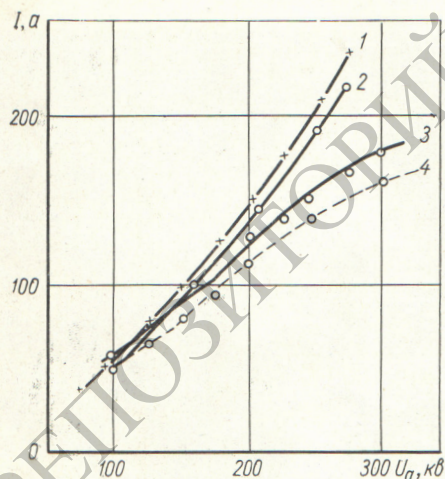


Рис. 9. Кривые токов эмиссии катода (I) и коллектора (I_c):

1 — расчетная кривая при первеансе $P = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ а/в}^3/\text{с}^2$; 2 — экспериментальная кривая, полученная при вакууме в области катода $(5 \div 7) \cdot 10^{-7} \text{ торр}$; 3 — усредненная экспериментальная кривая по результатам исследования пяти катодов; 4 — усредненный ток коллектора по результатам пяти экспериментов.

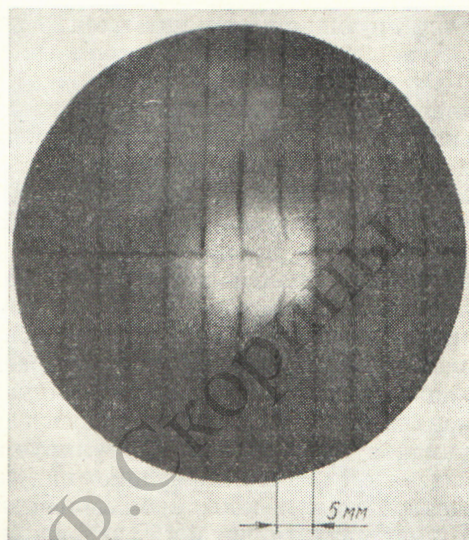


Рис. 10. След пучка на флуоресцирующем экране за коллектором.

твердили, что на срок службы катода сильно влияет присутствие паров масла в области катода. По кривым 3 и 4 видно, что коэффициент прохождения пучка через систему составляет 0,9. Оптимальное значение фокусирующего продольного поля равно 26 000 а/м, что хорошо совпадает с расчетными данными. При этом в области катода поле близко к нулю, что и соответствует условиям существования бриллюэновского потока. Диаметр пучка на коллекторе был равен 15—20 мм (рис. 10). Приведенные данные получены при измерении полного тока эмиссии катода осциллографом, сигнал на который снимался с сопротивления, включенного во вторичную цепь импульсного трансформатора пучки. Пучок на выходе из секции попадал на коллектор, величина тока измерялась также при помощи осциллографа и сопротивления, включенного в цепь коллектора. Форма пучка и его положение наблюдались на флуоресцирующем экране, установленном за танталовой пластиной. Величина энергии пучка ускоренных электронов оценивалась по суммированию напряжения индукторов и приращению тока на коллекторе, обусловленного увеличением скорости электронов. Получено хорошее совпадение энергий, измеренных обоими способами.

На рис. 11 приведена кривая изменения давления в зависимости от времени откачки секции без вакуумной трубки. Давление измерялось на удаленном от вакуумного насоса конце секции.

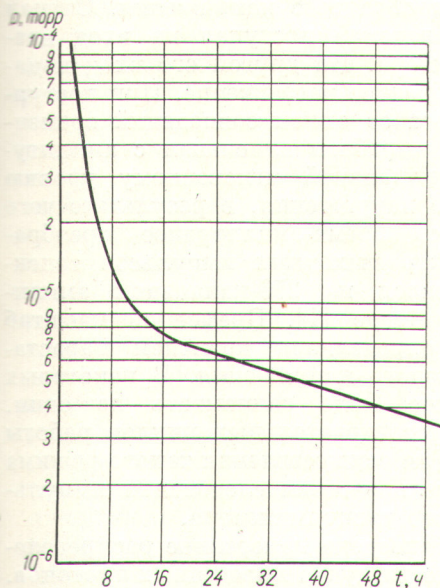


Рис. 11. Зависимость давления внутри ускорительной секции (без трубки) от времени откачки.

Ниже приводятся данные, полученные при испытании секции индукционного ускорителя.

Максимальный ток ускоренных электронов	180 а
Максимальная энергия инжектируемых электронов	300 кэв
Энергия ускоренных электронов	485 кэв
Длительность импульса тока пушки	2,2 мксек

Временная структура пучков частиц, выведенных из синхроциклотрона ОИЯИ

В. Г. ЗИНОВ, С. В. МЕДВЕДЬ, Е. Б. ОЗЕРОВ

УДК 621.384.611.1

Для пучков частиц, выведенных из синхроциклотрона ОИЯИ, определены формы кривых распределения интенсивности по времени. Для тех же пучков измерена временная структура, связанная с частотой ускоряющего напряжения. Показано отсутствие радиочастотной структуры в пучках вторичных частиц при медленном выводе, осуществленном на синхроциклотроне.

Изучение временной структуры пучка ускорителя представляет большой интерес. С одной стороны, знание ее помогает понять особенности ускорителя и выбрать пути улучшения его работы. С другой стороны, изучение этой структуры позволяет более строго оценивать возможности постановки физических экспери-

Длительность импульса ускоряющего напряжения	0,35 мксек
Длительность фронта импульса ускоряющего напряжения	0,18 мксек
Средний градиент ускоряющего поля	310 кВ/м
Диаметр ускоренного пучка (на выходе)	2 см

В проектировании ускорителя ЛИУ-3000 и испытании первой секции кроме авторов настоящей статьи принимали участие сотрудники НИИЭФА Р. А. Алексеев, Л. М. Андресен, А. В. Беляева, О. Д. Володин, М. А. Гашев, В. К. Гаген-Торн, Н. К. Дьяченко, Н. В. Толокнов, Ю. В. Лебедев, А. А. Мархель, П. Г. Мореев, А. В. Попкович, А. Н. Попов, С. В. Промышляев, Г. Л. Саксаганский, Я. Л. Михелис, А. Т. Чесноков.

Авторы с признательностью отмечают постоянный интерес к работе академика В. И. Векслера, В. П. Саранцева и выражают им благодарность за помощь в работе.

Поступила в Редакцию 14/IV 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. Christofilos. В кн. «Труды Международной конференции по ускорителям высоких энергий (Дубна, 1963)». М., Атомиздат, 1964, стр. 1073.
2. В. И. Векслер. «Атомная энергия», 2, 427 (1957).
3. A. Buwers. Elektrische Höchstspannungen. Berlin, 1939, § 15, S. 83.
4. О. Н. Литвиненко, В. И. Сошников. Теория неоднородных линий и их применение в радиотехнике. М., «Советское радио», 1964.

ментов. Кроме того, требования к параметрам регистрирующей аппаратуры в значительной степени обусловлены характером временной структуры пучков частиц.

Известно, что синхроциклотрон работает циклично. Временная структура выведенных пучков имеет двойную периодичность, связанную, во-первых, с частотой повторения циклов ускорения (макροструктура) и, во-вторых, с частотой ускоряющего напряжения (микроструктура).

В настоящей работе описываются способы изучения макро- и микроструктур и обсуждаются результаты измерений.