

Б-399

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

9 - 6848

БЕЗНОГИХ

Юрий Дмитриевич

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И НЕКОТОРЫЕ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ  
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ  
ПРОТОННО-ДЕЙТОННЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ  
СИСТЕМ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

Специальность 280 -  
электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1972

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:  
доктор технических наук

Л.П.Зиновьев

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук  
доктор физико-математических наук

М.С.Рабинович,  
В.И.Данилов

Ведущее научно-исследовательское учреждение:  
Украинский физико-технический институт, г.Харьков, УССР.

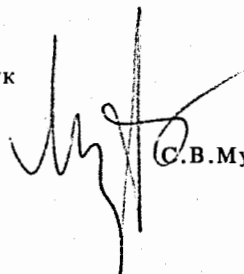
Автореферат разослан " 7 " *сентября* 1973 года

Защита диссертации состоится " 15 " *марта* 1973 года на заседании Ученого совета Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Адрес: г. Дубна, Московской области, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

  
С.В.Мухин

9 - 6848

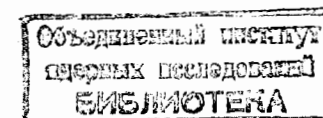
БЕЗНОГИХ  
Юрий Дмитриевич

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И НЕКОТОРЫЕ  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ  
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ  
ПРОТОННО-ДЕЙТОННЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ  
СИСТЕМ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ

Специальность 280 -  
электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Современные ускорительные комплексы - протонные синхротроны - могут быть охарактеризованы двумя основными параметрами: конечной энергией и конечной интенсивностью ускоренного пучка. Задачи экспериментальной ядерной физики и физики элементарных частиц постоянно требуют как повышения энергии ускоренного пучка, так и повышения его интенсивности. Так как рост энергии ускоренного пучка связан с ростом радиуса ускорительного кольца, то для уже созданных ускорителей с заданной конечной энергией основной проблемой является повышение интенсивности ускоренного пучка до предельных значений.

Если отвлечься от процессов ускорения в кольце синхрофазотрона, то повышение интенсивности ускоренного пучка в конце цикла ускорения связано, в первую очередь, с разработкой высокоэффективных инжекционных систем. Потребности в создании высокоэффективных инжекторов привели за последнее время к бурному развитию физики и техники протонных линейных ускорителей, так как эти установки способны отдавать в импульсе токи такой величины, которые обеспечивают по интенсивности насыщение кольца синхрофазотрона вплоть до кулоновского барьера.

Прямой путь увеличения интенсивности ускоренного пучка в синхрофазотроне ОИЯИ в конце цикла ускорения, который связан с увеличением тока инжекции, был ограничен возможностями линейного ускорителя с сеточной фокусировкой на энергию 9,4 Мэв /ЛУ-9/, так как величина предельного тока пучка на его выходе /  $\sim 1,5$  ма/ ограничивала число частиц, инжектируемых в камеру синхрофазотрона. При инжекции в камеру синхрофазотрона  $2 \cdot 10^{12}$  р/цикл максимальное число частиц в конце цикла ускорения получается порядка  $10^{11}$  р/цикл. Эта интенсивность не может удовлетворять возросшим требованиям постановки физического эксперимента.

Для получения интенсивности в конце цикла ускорения порядка  $10^{12}$  р/цикл и больше требуется существенно увеличить число частиц, инжектируемых в камеру ускорителя. В связи с этим еще в 1964 году было принято решение о разработке проекта протонного линейного ускорителя с магнитной квадрупольной фокусировкой на энергию 20 Мэв /ЛУ-20/.

В первой и второй главах реферируемой диссертации изложены физические основы, результаты расчета и моделирования основных узлов протонного линейного ускорителя с магнитной квадрупольной фокусировкой на энергию 20 Мэв - нового инжектора синхрофазотрона ОИЯИ. Полученные данные легли в основу проектирования и изготовления важнейших узлов линейного ускорителя, таких как объемный резонатор и трубки дрейфа ускоряюще-фокусирующего канала.

В первой главе рассмотрено продольное движение ускоряемых частиц. Анализ фазового движения неравновесных частиц производился на основе полученного разностного уравнения, которое позволяет по известным параметрам равновесного движения рассчитать фазовое состояние частицы в  $n$ -ом ускоряющем промежутке, зная фазовое состояние частицы в  $n-1$ -ом промежутке. Это уравнение имеет вид:

$$\left(1 + \frac{3}{2} \beta_{n,s}^2\right) \beta_{n,s} \beta_n' - \left(1 + \frac{3}{2} \beta_{n-1,s}^2\right) \beta_{n-1,s} \beta_{n-1}' = \\ = \frac{e E_0 T_n L_n}{\pi_0 C^2} \left[ \left(1 + J \frac{\beta_{n-1}^2}{\beta_{n-1,s}}\right) \cos \phi_n - \cos \phi_s \right],$$

где  $\beta_{n-1,s}$ ,  $\beta_{n,s}$  - относительная скорость синхронной частицы в  $(n-1)$ -ом и  $n$ -ом ускоряющем промежутках соответственно,  $E_0$  - средняя амплитуда напряженности ускоряющего поля на периоде ускорения,  $L_n$  - длина периода ускорения,  $T_n$  - фактор времени пролета,  $J$  - коэффициент, влияющий на характер затухания фазовых колебаний. В простейшем случае прямоугольной волны в зазоре  $J = 1 - \text{пастьга}$ ,  $a$  - коэффициент зазора.

В этой же главе рассматривается метод индикации, контроля энергетического спектра и нестабильности синхронной энергии пучка на выходе линейных ускорителей ионов с помощью прозрачных индукционных датчиков [1,2]. Метод индикации основан на выделении с помощью прозрачного датчика, установленного на участке инжекционного тракта, сигнала, пропорционального амплитуде  $K$ -ой, например, первой гармоники разложения в ряд Фурье периодической последовательности сгустков заряженных частиц. Анализ показывает, что амплитуда измеряемой гармоники является функцией фазовой ширины сгустка в месте установки прозрачного датчика, которая в свою очередь, линейно связана с энергетическим разбросом частиц в сгустке. На рис. 1 показаны нормализованные кривые изменения амплитуды первой гармоники в зависимости от фазовой полуширины сгустка для трех случаев аппроксимации функции распределения заряда в сгустке. Функция распределения начальных скоростей частиц в сгустке принята линейной относительно его центра.

На осциллограммах рис. 2 совершенно отчетливо наблюдается корреляция энергетического спектра пучка с уровнем ускоряющего в.ч. поля /электронная аппаратура, реализующая обсуждаемый метод, была установлена в тракте инжектора ЛУ-9/. Уровень ускоряющего поля в резонаторе, при котором получается наибольший сигнал с пикап-электрода, соответствует минимальному энергетическому спектру ускоренных частиц.

При наличии источника когерентных фазовых колебаний в ускоряющей системе линейного ускорителя за время импульса инжекции возможно изменение средней энергии пучка, что приводит к "ползучести" спектра за время инжекции. Измерение нестабильности средней энергии осуществляется в системе с двумя индукционными датчиками, установленными на участке свободного дрейфа пучка на расстоянии  $l$  друг от друга. Фазы первой гармоники с этих датчиков сравниваются на фазовом детекторе.

Во второй главе рассмотрено радиальное движение частиц в линейном ускорителе ЛУ-20. Произведен анализ радиальной устойчивости частиц. Даны обоснования режима и расчета градиентов магнитных полей квадрупольных линз в принятой структуре радиальной фокусировки типа ФОДО.

Уравнения радиального движения в рассматриваемой ускоряюще-фокусирующей структуре имеют вид:

$$\frac{d^2 x}{d\theta^2} + p(\theta) x = 0 \quad /2/$$

$$\frac{d^2 y}{d\theta^2} + \bar{p}(\theta) y = 0, \quad /3/$$

где

$$p(\theta) = \Delta(\theta) \delta(\theta - \theta_{n,0}) + \Omega_{on}^2(\theta) h(\theta);$$

$$\bar{p}(\theta) = \Delta(\theta) \delta(\theta - \theta_{n,0}) + \Omega_{on}^2(\theta) h(\theta);$$

$$\Delta(\nu) = \frac{\pi e E_0 T(\theta) (1 - \beta_{n,s}^2) \lambda \sin \phi_0}{\pi_0 \beta_{\theta,s} c^2} -$$

величина, характеризующая радиальную дефокусирующую силу от действия ускоряющего в.ч. поля и зависящая от продольной  $\theta$ -координаты частицы. Эта величина принята сосредоточенной в энергетическом центре ускоряющего промежутка  $(\theta_{n,0})$ , т.е. действует на частицу как дельта-функция  $\delta(\theta - \theta_{n,0})$ .

Величина

$$\Omega_{on}^2(\theta) = \frac{e \beta \theta_s}{\pi \theta} \frac{1}{f^2} |H'| \theta$$

$f$  - частота ускоряющего поля,  $H'$  - градиент поперечного магнитного поля / - характеризует радиальное действие поля квадрупольных линз на ускоряемую частицу.  $h(\theta)$  - знакопеременная функция.

Коэффициенты  $p(\theta)$  и  $\bar{p}(\theta)$  в уравнениях /2/ и /3/ не являются строго периодическими функциями времени из-за изменения энергии частиц и параметров ускоряюще-фокусирующего канала, а также вследствие фазовых колебаний частиц. Эти изменения заложены в непостоянстве величин  $\Delta(\theta)$  и  $\Omega_{on}^2(\theta)$ . Для аналитического рассмотрения /например, при анализе устойчивости поперечного движения/ полезно допустить строгую периодичность коэффициентов  $p(\theta)$  и  $\bar{p}(\theta)$ . При этом некоторые важные выводы теории являются справедливыми и в реальном случае, когда указанные коэффициенты адиабатически меняют свое значение вследствие роста энергии ускоряемых частиц.

Для построения диаграммы устойчивости и расчета необходимых градиентов фокусирующих полей в квадрупольных линзах трубок дрейфа был применен матричный метод анализа уравнений движения /2/ и /3/. Расчет градиентов полей в квадрупольных линзах производился из условия  $\Omega_{on}^2 = const$ , что изменяет фазу поперечных колебаний на периоде фокусировки для синхронной частицы в начале ускорения  $\cos \mu_s = 0,6$  и соответственно  $\cos \mu_s = 0,3$  в конце ускорения. На рис. 3 показана диаграмма устойчивости поперечного движения.

При проектировании магнитной системы квадрупольных линз большое внимание было уделено улучшению их магнитных характеристик. В результате экспериментального изучения плоского полюса /3-5/ разработан модифицированный плоский полюс /6/, который дает меньшую нелинейность градиента поля по радиусу апертуры, что существенно расширяет рабочую область жестко-фокусирующего канала /рис. 4/. Модифицированный плоский полюс при определенных соотношениях размеров профиля практически сводит к нулю только шестую, но и десятую азимутальные гармоники искажения поля. Такой полюс по сравнению с плоским полюсом позволяет расширить рабочий радиус апертуры линзы без увеличения габаритов самой линзы.

В последнее время большой интерес проявляется к вопросам использования существующих протонных синхротронов для ускорения более тяжелых ядер, чем ядра водорода, например, ядер дейтерия

и гелия /7-11/. Это связано с возможностью получения в результате реакции стриппинга квазимонохроматических нейтронных пучков, что дает возможность изучать процессы пр-взаимодействий лучше, чем в пучках нейтронов, полученных при облучении какой-либо мишени ускоренными протонами. Весьма большой интерес представляет также изучение взаимодействия релятивистского сложного ядра с веществом /12/. При наличии достаточно интенсивного источника легких ядер /13,14/ условия их прохождения, без учета процесса перезарядки, через ускорительный комплекс протонного синхротрона, настроенного на ускорение дейтронов, практически сохраняются. Поэтому изучение ускорения дейтронов и  $\alpha$ -частиц на существующих протонных синхротронах представляет значительный интерес с точки зрения изучения ускорения более тяжелых ядер.

В третьей главе диссертации рассмотрены физические основы и экспериментальные результаты ускорения дейтронов в протонном линейном ускорителе ЛУ-9 с сеточной фокусировкой - инжекторе синхрофазотрона ОИЯИ /15/. Обоснована необходимость уменьшения ускоряющих зазоров в два раза при переходе на режим ускорения дейтронов с двойной кратностью дрейфа. В этой же главе изложен метод предварительного двухззорного группирования пучка, поступающего на вход линейного ускорителя ионов /16-18/.

Реализация режима ускорения дейтронов на базе существующего ускорительного комплекса синхрофазотрона /10,11/ была связана с известной трудностью получения достаточно интенсивного тока инжекции на выходе ЛУ-9, так как в этом режиме /в известной схеме перехода на двойную кратность дрейфа /19// требовалось снизить напряжение на ускорительной трубке форинжектора в два раза. В результате параметры пучка форинжектора на входе линейного ускорителя резко ухудшались, и максимальный дейтронный ток на выходе ЛУ-20 не превышал 200  $\mu A$  в импульсе. Рассматриваемый метод двухззорного группирования пучка заряженных частиц на входе ускоряющей структуры линейных ускорителей ионов может быть реализован в виде отдельного двухззорного группирователя с трубкой дрейфа или в виде двухззорного группирователя, совмещенного с ускоряющей структурой линейного ускорителя /рис. 5/.

В случае ускорения дейтронов в ЛУ-9 был осуществлен вариант совмещенного двухззорного группирователя с инжекцией в пятый зазор ускоряющей структуры /рис. 6,7/, что дало возможность увеличить ускоряющий потенциал на трубке форинжектора до 525 кв /вместо 285/. Это позволило увеличить дейтронный ток ускоренного пучка на выходе ЛУ-9 примерно в 5-6 раз, что, в конечном счете, явилось одним из определяющих факторов в успешном осуществлении режима ускорения достаточно интенсивного пучка дейтронов на синхрофазотроне ОИЯИ /20,21/.

Следует отметить, что двухззорная группировка ионов может оказаться полезной для ускорительных комплексов форинжектор - линейный ускоритель, существующих на других ускорителях подобного типа. Во-первых, двухззорный группирователь, совмещенный с ускоряющей структурой, не требует для своей работы отдельного источника питания, фазирующих устройств и т.п., так как его нормальная работа осуществляется автоматически при возбуждении резонатора на волне типа  $E_{010}$ , во-вторых, такой группирователь менее чувствителен к нестабильности энергии пучка, поступающего из форинжектора, и, в-третьих, ввиду существенного сокращения базы дрейфа /примерно на порядок по сравнению с клистронным/ двухззорный группирователь способен эффективно обеспечить начальную группировку более сильноточных пучков, чем при применении клистронного группирователя

В четвертой главе изложены физические основы модернизации линейного ускорителя с сеточной фокусировкой ЛУ-9. Приведены некоторые экспериментальные результаты по измерению основных параметров ускоренного протонного пучка, таких как поперечный эмиттанс и энергетический спектр.

При реконструкции инжектора ЛУ-9, которая заключалась в переделке ускоряющего канала на жестко-фокусирующий вариант, в основу были положены расчеты ускоряюще-фокусирующего канала ЛУ-20 /для ускорения протонов/, а также результаты, полученные при ускорении дейтронов в инжекторе ЛУ-9. Проект реконструкции предусматривал создание ускоряющего канала, способного эффективно ускорять три сорта частиц: протоны  $\frac{q}{m} = 1$ , при кратности дрейфа  $q = 1$ , дейтроны  $\frac{q}{m} = 1/2$ , при кратности дрейфа  $q = 2$  /и однозарядный гелий  $\frac{q}{m} = 1/4$ , при кратности дрейфа  $q = 3$ /. Последний режим, который реализуется при настройке ускоряющего канала на дейтронный вариант, позволяет получить на выходе линейного ускорителя ЛУ-9М интенсивный поток частиц однозарядного гелия при энергии 1,04 Мэв/нуклон, а после стриппинга - поток  $\alpha$ -частиц для инъекции их в камеру синхрофазотрона. После завершения реконструкции на выходе инжектора ЛУ-9М был получен пучок ускоренных протонов с током в импульсе  $\sim 15 \text{ мА}$  ( $J_{ма\bar{x}} 19 \text{ мА}$ ). Это близко к расчетному току, т.к. существующий форинжектор дает пучок с током в импульсе  $\sim 40 \text{ мА}$  в апертуре  $2A = 13 \text{ мм}$  на входе линейного ускорителя. ЛУ-9М позволил еще до запуска инжектора ЛУ-20 начать изучение поведения пучка в кольце синхрофазотрона при существенно больших токах инъекции протонов, чем это мог обеспечить устаревший инжектор ЛУ-9 с сеточной фокусировкой. При токе инъекции  $I_{инж.} = 15 \text{ мА}$  был получен квазибетатронный режим в камере синхрофазотрона с числом частиц в циркулирующем пучке  $N_{p,\beta} = 8,4 \cdot 10^{12}$  р/импульс, что примерно в 10 раз больше, чем с инжектором ЛУ-9.

В режиме ускорения дейтронов на второй кратности дрейфа был получен ускоренный пучок с током в импульсе  $I_d = 8 \text{ мА}$  и соответственно число частиц  $N_{d,\beta} = 4 \cdot 10^{12}$  д/импульс. Высокая эффективность ЛУ-9М как инжектора частиц с  $\epsilon = \frac{e}{m} \sim 1/2$  позволит существенно продвинуть экспериментальное изучение проблемы ускорения на синхрофазотроне ОИЯИ легких ядер начальных элементов периодической таблицы.

На рис. 8 показан общий вид расположения инжекторов ЛУ-9М и ЛУ-20 относительно кольца синхрофазотрона. После запуска инжектора ЛУ-20 линейный ускоритель ЛУ-9М будет использоваться в основном как инжектор полностью ионизированных ядер.

Таким образом, синхрофазотрон будет иметь многоцелевую инжекционную систему, в результате чего будут получены качественно новые пучки заряженных частиц, которые позволят значительно расширить экспериментальные возможности синхрофазотрона ОИЯИ.

Подводя итог вышесказанному, можно следующим образом сформулировать основные результаты:

1. Разработаны физические основы протонного линейного ускорителя с магнитной квадрупольной фокусировкой на энергию 20 Мэв - инжектора синхрофазотрона ОИЯИ.

Теоретический анализ продольного и поперечного движения ускоряемых протонов дал возможность обоснованно подойти к выбору и расчету основных параметров ускоряющей системы ЛУ-20 /резонатора, трубок дрейфа, настроенных элементов/, а также к расчету необходимых радиально-фокусирующих полей магнитных квадрупольных линз, обеспечивающих радиальную устойчивость ускоряемых частиц.

2. Экспериментальное исследование плоского полюса квадрупольной линзы позволило выявить оптимальный, с точки зрения изменения в трубках дрейфа линейных ускорителей, профиль, в котором отсутствуют шестая и десятая азимутальные гармоники искажения поля /модифицированный плоский полюс/. Экспериментально установлены размеры профиля модифицированного плоского полюса в зависимости от радиуса магнитной апертуры.

Поскольку модифицированный плоский полюс существенно расширяет рабочий радиус магнитной апертуры квадрупольной линзы, то он может быть рекомендован для магнитных жестко-фокусирующих каналов линейных ускорителей ионов.

3. Предложена и экспериментально проверена методика индикации энергетического спектра пучка на выходе линейных ускорителей ионов по проходящему пучку с помощью прозрачных индукционных датчиков.

4. Предложена методика индикации средней энергии пучка на выходе линейных ускорителей ионов.

5. Разработаны физические основы ускорения дейтронов в протонном линейном ускорителе с сеточной фокусировкой. В результате расчетно-теоретических и экспериментальных исследований были найдены оптимальные режимы для эффективного ускорения дейтронов в линейном ускорителе - инжекторе синхрофазотрона ОИЯИ.

6. Предложен и теоретически обоснован метод двухазорного группирования ионов на входе линейных ускорителей. Двухазорная группировка может быть реализована в виде отдельного от резонатора ЛУ- группирователя или в виде двухазорного группирователя, совмещенного с ускоряющей структурой ЛУ.

7. Реализация метода двухазорного группирования в ЛУ-9 - инжекторе дейтронов синхрофазотрона ОИЯИ позволила разработать систему совмещенного двухазорного группирователя с инжекцией в пятый зазор ускоряющей структуры линейного ускорителя. Это дало возможность увеличить ток дейтронного пучка на выходе ЛУ-9 в 5-6 раз, что, в конечном счете, явилось одним из определяющих факторов в успешном осуществлении режима ускорения достаточно интенсивного пучка дейтронов в синхрофазотроне ОИЯИ.

8. На основе выполненных работ по физическому обоснованию инжектора ЛУ-20 и ускорению дейтронов в протонном линейном ускорителе с сеточной фокусировкой ЛУ-9 осуществлена реконструкция ускоряюще-фокусирующей структуры ЛУ-9, в результате чего максимальное число частиц в пучке, циркулирующем в камере синхрофазотрона /квазибетатронном режиме/, увеличилось в ~10 раз при ускорении протонов и, соответственно, в 15 раз при ускорении дейтронов. Высокая эффективность ЛУ-9М как инжектора дейтронов позволяет осуществить инжекцию в камеру синхрофазотрона других ядер после завершения работ по созданию источника многозарядных ионов.

Основное содержание диссертации изложено в работах /1,2,6,10, 11, 15-21/, опубликованных в виде статей, препринтов и докладов на конференциях по ускорителям заряженных частиц.

## Литература

1. Ю.Д.Безногих, М.А.Воеводин. Индикация энергетического спектра пучка заряженных частиц на выходе линейного ускорителя ионов при помощи прозрачного индукционного датчика. ПТЭ, №4, 1971 г.
2. Yu.D.Beznogikh, M.A.Voevodin, L.P.Zinovjev, V.G.Dudnikov. Measurements of energy spectrum and instability of Synchronous beam energy at the output of the ion linac by means of transparent pick-ups during operation. Proceedings of the 8 international conference on high-energy accelerators. CERN, 1971, 423-425.
3. И.М.Капчинский. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. Атомиздат, 1966 г.
4. В.К.Плотников. О выборе формы полюсов квадрупольных линз. ПТЭ, №2, 1962 г.
5. Е.Н.Данильцев, В.К.Плотников. Магнитные квадрупольные линзы для линейного ускорителя с пролетными трубками. ПТЭ, №3, 1963 г.
6. Ю.Д.Безногих, М.А.Воеводин, Л.П.Зиновьев. Модифицированный плоский полюс для жесткофокусирующего канала линейного ускорителя ионов. ПТЭ, №3, 1971 г.
7. PPA Staff Princeton USA. The Princeton-Pennsylvania Rapid Cycling 3 GeV Proton Synchrotron-Recent Improvements and Future Plans. Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Издательство Академии наук Армянской ССР, Ереван, 1970.
8. P. Bernard et al., New facilities at Saturne. Труды VII Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Издательство Академии наук Армянской ССР, Ереван, 1970.
9. Th.Sluyters. Preprint CERN, 64-22, Geneve, 1964.
10. Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов. Препринт ОИЯИ, Р9-4214, Дубна, 1968.
11. Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов. ПТЭ, №4, 1969.
12. А.М.Балдин. Препринт ОИЯИ, Р7-5808, Дубна, 1970.
13. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. Препринт ОИЯИ, Е7-4124, Дубна, 1968.
14. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. Препринт ОИЯИ, Р7-4469, Дубна, 1969.
15. Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев. Препринт ОИЯИ, Р9-5610, Дубна, 1971.
16. Ю.Д.Безногих. Препринт ОИЯИ, Р2-5276, Дубна, 1970.
17. Ю.Д.Безногих. ПТЭ, №4, 1971.
18. Ю.Д.Безногих. Линейный ускоритель ионов. Бюллетень "Открытия, изобретения ...", №26, 1971 г. Авторское свидетельство № 313319.
19. E.D.Courant. United States Patent Office 3,374,378. Patented Mai, 19, 1968.

20. А.М.Балдин, Ю.Д.Безногих, Л.П.Зиновьев, И.Б.Иссинский, Г.С.Казанский, А.И.Михайлов, В.И.Мороз, Н.И.Павлов, Г.П.Пучков. Препринт ОИЯИ, Р9-5442, Дубна, 1970.
21. A.M.Baldin, Yu.D.Beznogikh, I.B.Issinsky, G.S.Kazansky, A.I.Mikhailov, V.I.Moroz, N.I.Pavlov, G.P.Puchkov, I.N.Semenjiushkin, L.P.Zinovjev. Acceleration and Ejection of Deuterons of the Dubna Synchrophazotron. IEEE Trans. Nucl. Sci., v NS-18, Num. 3, 1024 (1971).

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 декабря 1972 года.

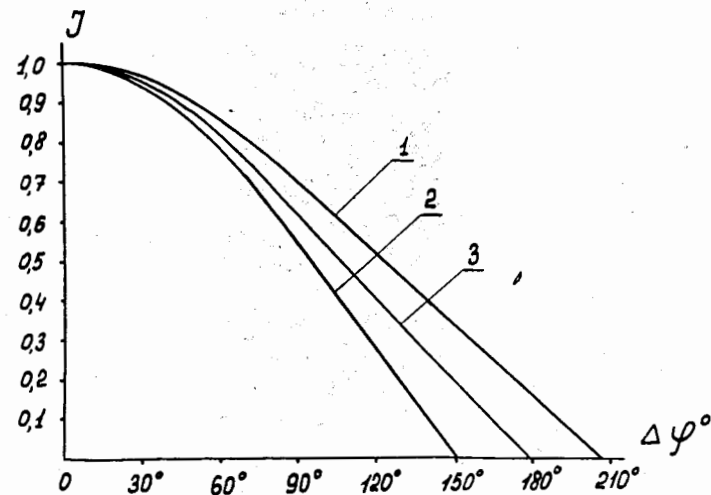


Рис. 1. Нормализованные кривые изменения амплитуды первой гармоники в зависимости от фазовой полуширины сгустка. 1 - аппроксимация функции распределения заряда в сгустке равномерно заряженным эллипсоидом, 2 - неравномерно заряженным цилиндром, 3 - равномерно заряженным цилиндром.



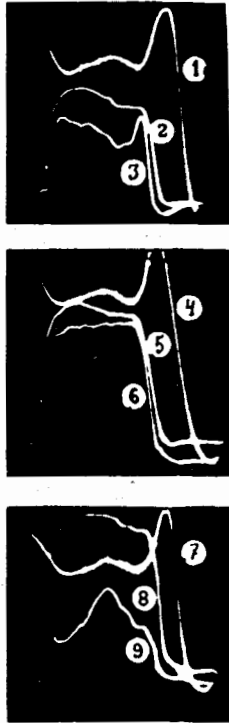


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока ускоренного пучка /кривые 2,5,8/, сигнала с датчика спектра /кривые 3,6,9/ для различного уровня ускоряющего поля в резонаторе линейного ускорителя ЛУ-9 /кривые 1,4,7/. Кривая 1 соответствует уровню ускоряющего поля  $U_1 = U_{\text{ном.}} + 0,014U_{\text{ном.}}$ , кривая 4 -  $U_4 = U_{\text{ном.}}$ , кривая 7 -  $U_7 = U_{\text{ном.}} - 0,014U_{\text{ном.}}$ . 1,4,7 - вершины плоской части огибающих импульсов с измерительной петли на уровне 5-7 в. Полные импульсы с измерительной петли  $U_1 = 152$  в,  $U_4 = 150$  в,  $U_7 = 148$  в.

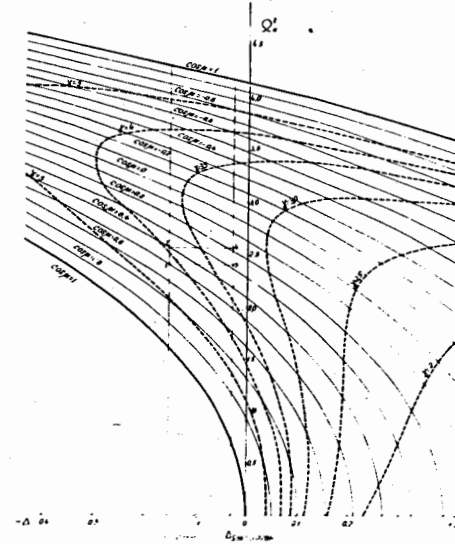


Рис. 3. Диаграмма устойчивости для поперечного движения протонов в линейном ускорителе ЛУ-20.

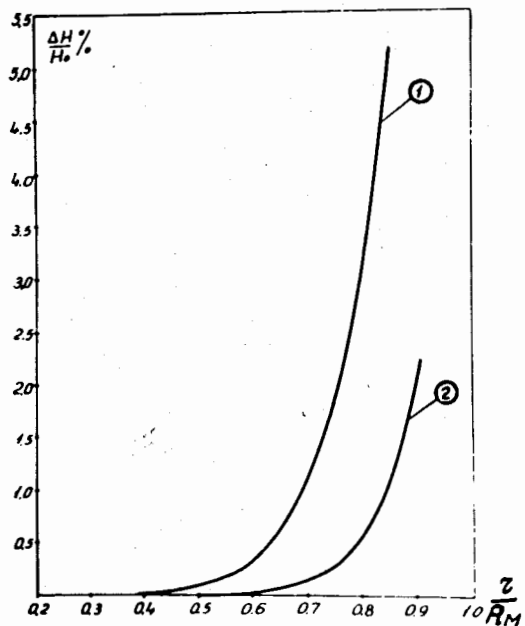


Рис. 4. Нелинейность магнитного поля в зависимости от радиуса для плоского полюса /1/ и для модифицированного плоского полюса /2/.  $R_M$  - радиус магнитной апертуры.

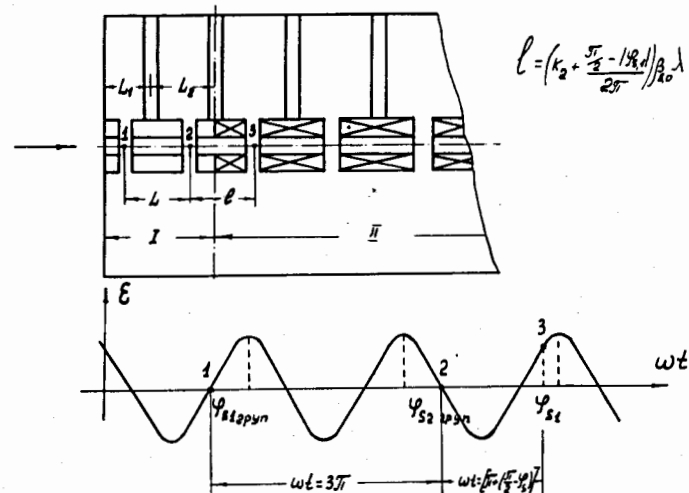


Рис. 5. Двухзазорный группирователь, совмещенный с ускоряющей структурой линейного ускорителя.

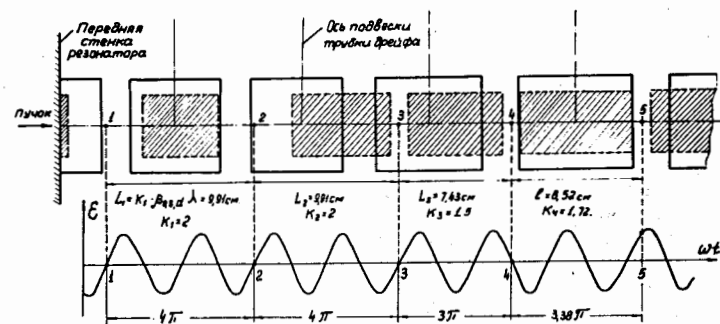


Рис. 6. а/. Геометрия трубок дрейфа начальной части резонатора ЛУ-9. Сплошной контур - при ускорении протонов. Пунктирный контур со штриховкой - при ускорении дейтронов. б/. Положение синхронной частицы в электрических центрах зазоров относительно фазы ускоряющего поля.

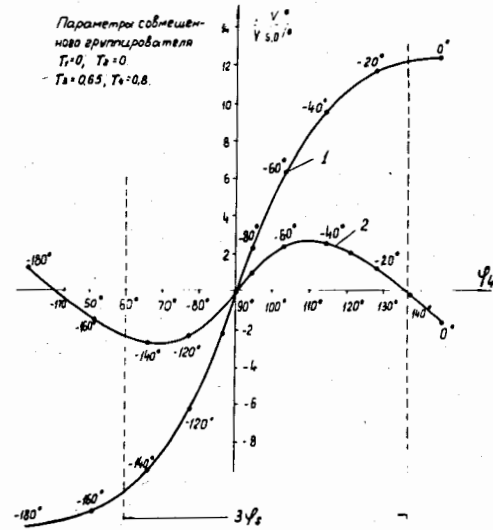


Рис. 7. Кривые фазовой группировки дейтронов в зазорах двухзазорного группирователя /третий и четвертый зазоры структуры/. 1 - энергетический разброс сгруппированных частиц после прохождения первого зазора группирователя /третьего зазора структуры/, 2 - энергетический разброс сгруппированных частиц за вторым зазором группирователя /четвертым зазором структуры/. На кривых 1,2 указаны фазы частиц в первом зазоре группирователя.

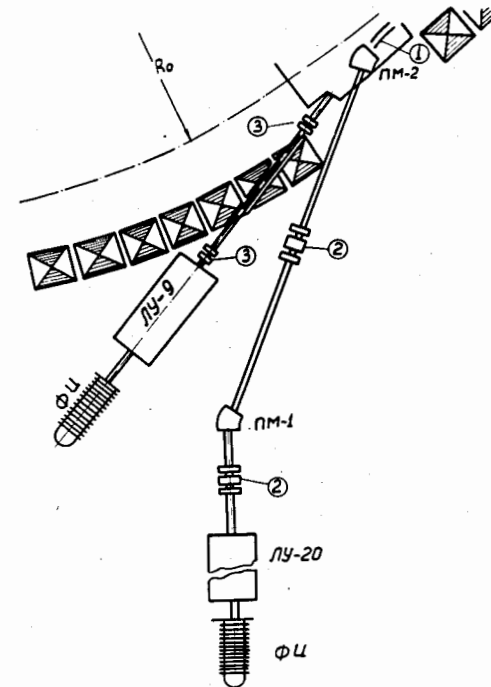


Рис. 8. Схема расположения инжекторов ЛУ-9М и ЛУ-20 синхрофазотрона ОИЯИ. 1 - электростатический инфлектор, 2 - триплеты квадрупольных линз, 3 - дублиты квадрупольных линз, ПМ-1, ПМ-2 - поворотные магниты.