

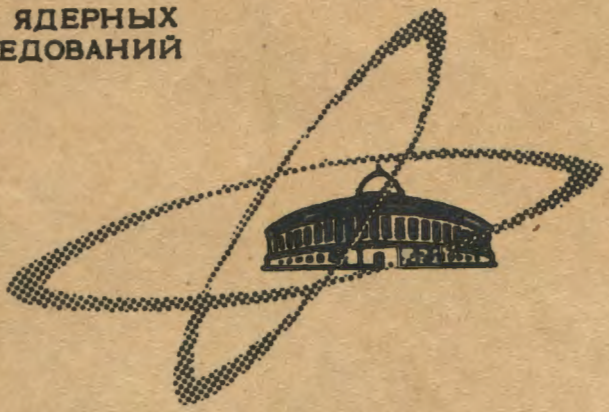
10/21-76

Б-399

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P2 - 5276



Ю.Д. Безногих

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

О ГРУППИРОВАНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
НА ВХОДЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ

1970

P2 - 5276

Ю.Д. Безногих

**О ГРУППИРОВАНИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
НА ВХОДЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ**

Направлено в ПТЭ

8535/2 169

Известно, что пучок заряженных частиц, непрерывно поступающий из форинжектора на вход линейного ускорителя ионов, используется частично и степень его использования определяется углом захвата линейного ускорителя, который равен примерно  $3\phi_s$ , где  $\phi_s$  - значение синхронной фазы. Обычно  $\phi_s$  выбирают порядка  $30 - 35^\circ$ , поэтому для дальнейшего ускорения в линейном ускорителе ионов практически используется  $1/4$  пучка, поступающего из форинжектора.

Для повышения эффективности использования пучка форинжектора между линейным ускорителем и форинжектором устанавливают высокочастотный группирователь - одноазорный резонатор клистронного типа. Эффективность такого группирователя, который располагают обычно на расстоянии порядка 1 м от входа линейного ускорителя, зависит, вообще говоря, от интенсивности группируемого пучка.

При больших токах пучка из форинжектора (порядка нескольких сотен миллиампер) на участке дрейфа между группирователем и входом линейного ускорителя на частицы действуют, с одной стороны, фазирующие силы, заданные в зазоре группирователя, а с другой стороны, кулоновские силы продольного расталкивания, препятствующие группировке частиц по фазам. Поскольку функция распределения плотности заряда по поперечному сечению пучка имеет ярко выраженную неравномерность

(больше на оси пучка и спадает до нуля на радиусе  $r_0$ , где  $r_0$  - радиус пучка), то распределение частиц по скорости на участке дрейфа между группирователем и входом линейного ускорителя неоднозначно связано с законом фазирующих сил, заданным в зазоре группирователя. В результате при больших токах группируемого пучка с неравномерным распределением плотности заряда по поперечному сечению возникает некоторая неопределенность как в выборе положения группирователя, так и в выборе амплитуды фазирующего напряжения на зазоре группирователя. Эта неопределенность заключается в том, что указанные параметры получаются не одинаковыми для частиц, расположенных на разных радиусах по сечению пучка. Указанная неопределенность могла быть устранена при условии максимального приближения клистронного группирователя к входной части резонатора линейного ускорителя, но в этом случае для получения оптимальной фазировки группируемых частиц на зазор группирователя нужно подать столь большое напряжение, что часть частиц может выйти за пределы сеператриссы линейного ускорителя из-за большого разброса по импульсам группируемых частиц.

Первые эксперименты по группированию сильноточных пучков показали заметное снижение эффективности одноазорного группирователя при токах группирования порядка  $300 - 400 \text{ ма}^{1,2/}$ . В указанных работах приведены экспериментальные результаты, которые показывают, что при работе с группирователями ток на выходе линейного ускорителя возрастает всего на  $30-35\%$  ( $100 \text{ ма}$  на выходе ЛУ без группирователя и  $130-135 \text{ ма}$  с группирователем). При больших токах группируемого пучка можно ожидать еще большего снижения эффективности работы клистронного группирователя.

Найти точное описание поведения частиц на участке дрейфа при больших токах группируемого пучка даже если известна функция распределения плотности заряда по сечению пучка - задача весьма трудная.

Но можно получить некоторые полезные качественные оценки поведения пучка на участке дрейфа между выходом группирователя и входом в резонатор линейного ускорителя в предположении, что до группирователя группированный пучок представляет собой бесконечно длинный равномерно заряженный цилиндр радиуса  $r_0$ , а после группирователя радиус пучка остаётся постоянным вдоль оси  $z$  и плотность — равномерной по радиусу. Распределение же плотности заряда от продольной координаты зависит, в соответствии с действием группирователя, периодическим образом. Кроме того, полагаем, что отдельные сгустки не взаимодействуют друг с другом, а частицы в сгустках по продольной оси  $z$ , уплотняясь, не обгоняют друг друга.

Тогда в соответствии с результатами работы /3/ можно записать уравнение движения группированной частицы с учётом действия объемного заряда на участке дрейфа после группирователя (для осевой частицы).

$$x = x_0 - \nu \theta \sin x_0 + \theta^3 A \sin x_0 + \theta^4 B \sin 2x_0 + \theta^5 (C \sin x_0 + D \sin^3 x_0) + \dots, \quad (1)$$

где  $x = \frac{2\pi}{\beta\lambda} z$  — безразмерная продольная координата,  $x_0$  — начальная фаза частицы в зазоре группирователя

$$\nu = \sqrt{\frac{m}{4\pi\rho_0 e}} \omega k, \quad k = \frac{\Delta\beta}{\beta},$$

$\Delta\beta$  — увеличение скорости, получаемой частицей в зазоре группирователя,  $\beta$  — скорость частицы после форинжектора,  $\theta = \sqrt{\frac{4\pi\rho_0 e}{m}} t$  — безразмерная независимая переменная.

Постоянные  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  зависят от параметра группировки  $\nu$  и параметров группированного пучка.

В уравнении (1) первые два члена определяют движение частицы на участке дрейфа без учёта сил пространственного заряда, члены же, содержащие  $\theta$  высших степеней, определяют движение частицы с учётом сил пространственного заряда.

На рис. 1 построены кривые изменения фазы группируемых частиц на участке дрейфа между группирователем и входом линейного ускорителя. За  $0^\circ$  принята фаза синхронной частицы, которая проходит зазор группирователя при нулевом напряжении. Все кривые рассчитаны для начальной фазы  $\phi_{\text{нач}} = 57^\circ$  ( $x_0 = 1$ ). Радиус пучка  $r_0 = 0,75$  см. Начальная энергия пучка  $W_{\text{форинж.}} = 0,57$  Мэв. Кривая 1 - изменение фазы частицы без учёта сил пространственного заряда, 2 - соответственно при  $\rho_0 = 0,5085 \cdot 10^9$  протон/см<sup>3</sup> ( $I = 150$  ма); 3 - при  $\rho_0 = 1,59 \cdot 10^9$  протон/см<sup>3</sup> ( $I = 450$  ма); 4 - при  $\rho_0 = 2,54 \cdot 10^9$  протон/см<sup>3</sup> ( $I = 750$  ма). Для кривых 1,2,3,4 принято  $\frac{\Delta\beta}{\beta} = 0,022$ .

Если вход линейного ускорителя расположить на расстоянии 70–80 см от выхода группирователя (рис. 1), то для частиц с плотностью заряда  $\rho_0 = 0,5085 \cdot 10^9$  протон/см<sup>3</sup> получается оптимальная группировка (при этом за счёт кулоновских сил происходит практически полная компенсация амплитудной добавки к скорости, получаемой частицей в зазоре группирователя).

Для частиц же с большей плотностью пространственного заряда (кривые 3,4) группировка малоэффективна, больше того, с ростом  $\rho_0$  можно получить эффект фазовой разгруппировки (кривая 4). Можно увеличить амплитуду группирующего поля в зазоре группирователя и уменьшить пространство дрейфа до 35–40 см (кривые 1', 2', 3', 4' для которых  $\frac{\Delta\beta}{\beta} = 0,044$ ) с тем, чтобы получить полную компенсацию скорости группируемых частиц для максимально ожидаемой плотности группируемого пучка (кривая 4' для  $\rho_0 = 2,54 \cdot 10^9$  протон/см<sup>3</sup>), но тогда час-

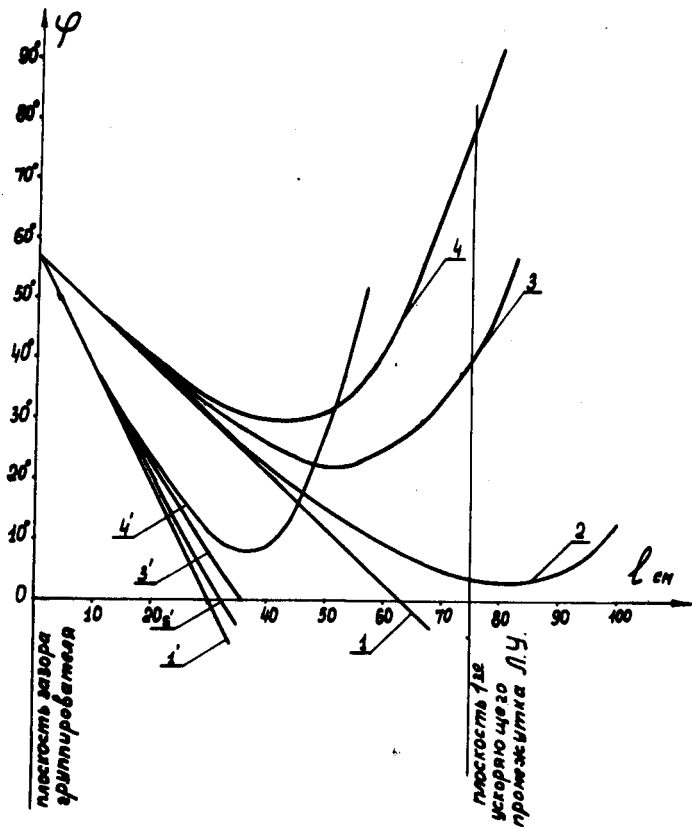


Рис. 1. Кривые изменения фазы группируемых частиц на участке дрейфа в зависимости от величины группируемого тока и амплитуды группируемого напряжения.

тицы с меньшей плотностью пространственного заряда будут иметь на входе в линейный ускоритель недопустимо большой разброс по импульсам (кривые 1', 2', 3').

В настоящей работе рассмотрен двухзазорный группирователь с трубкой дрейфа <sup>4,5/</sup>, в первом зазоре которого действуют большие фазирующие силы, группирующие частицы на коротком участке дрейфа (порядка 10 см) между первым и вторым зазором группирователя, а второй зазор группирователя работает в режиме выравнивания энергетического разброса сгруппированных частиц.

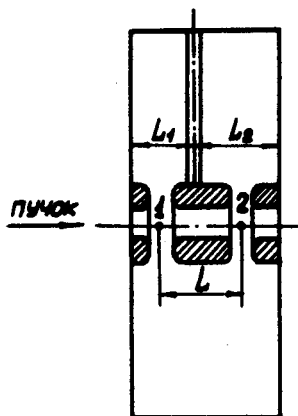
Поскольку пространство дрейфа группируемых частиц (расстояние между электрическим центром 1-го зазора и электрическим центром 2-го зазора группирователя) в данной конструкции существенно меньше, чем для клистронного группирователя, а второй участок дрейфа (между электрическим центром 2-го зазора группирователя и электрическим центром первого ускоряющего промежутка линейного ускорителя ионов) определяется лишь конструктивными возможностями сближения группирователя с входной частью линейного ускорителя, т.е. тоже может быть весьма малым, то данная конструкция в принципе должна обеспечивать более эффективную группировку заряженных частиц при больших токах пучка, чем группирователь клистронного типа.

#### Двухзазорный группирователь с трубкой дрейфа

На рис. 2а схематически изображен двухзазорный группирователь с трубкой дрейфа.

На рис. 2б показана диаграмма в координатах  $\xi$ ,  $\omega t$ , поясняющая работу группирователя.  $\xi$  - напряженность электрического поля на оси группирователя.





$$L = \kappa \beta_{z,0} \lambda$$

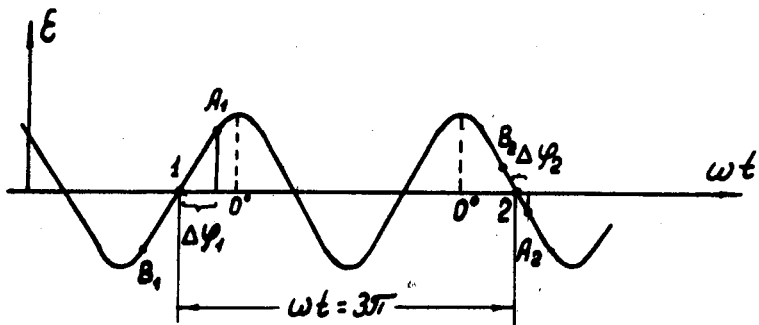


Рис. 2. Схема двухазорного группирователя с трубкой дрейфа.

Назовем синхронной частицу, которая проходит электрический центр 1-го зазора группирователя при фазе  $\phi_{s,1} = -\frac{\pi}{2}$  (точка "1" рис. 2). Двухзазорная система группирователя рассчитана таким образом, что синхронная частица проходит электрический центр второго зазора при фазе в/ч поля  $\phi_{s,2} = +\frac{\pi}{2}$ , пройдя путь от электрического центра 1-го зазора до электрического центра 2-го зазора, равный  $L = 1,5 \beta_{s,0} \lambda$ , где  $\lambda$  - длина ускоряющей волны линейного ускорителя (и, соответственно, группирователя).

Рассмотрим поведение несинхронной частицы, проходящей электрический центр 1-го зазора, например, в точке А (рис. 2) при фазе

$$\phi_1 = -\frac{\pi}{2} + \Delta\phi_1.$$

Эта частица получает в первом зазоре дополнительный положительный прирост энергий, равный

$$\Delta W_1 = e U_1 T_1 \cos \phi_1,$$

$U_1$  - амплитудное значение напряжения электрического поля в 1-ом зазоре группирователя.  $T_1$  - фактор времени пролета 1-го зазора группирователя.

Поскольку  $\Delta W_1 > 0$ , то рассматриваемая частица попадает в электрический центр 2-го зазора группирователя при фазе  $\phi_2 = \frac{\pi}{2} + \Delta\phi_2$ , причем  $|\Delta\phi_2| < |\Delta\phi_1|$ . Таким образом, частица А во втором зазоре группирователя получает дополнительный, теперь уже отрицательный, прирост энергии (поскольку  $\phi_2 > \frac{\pi}{2}$ ), равный

$$\Delta W_2 = e U_2 T_2 \cos \phi_2.$$

Для некоторой (оптимальной) фазы  $\phi_1$  можно выбрать параметры группирователя ( $U_1, U_2, T_1, T_2$ ) так, чтобы  $|\Delta W_1| = |\Delta W_2|$ .

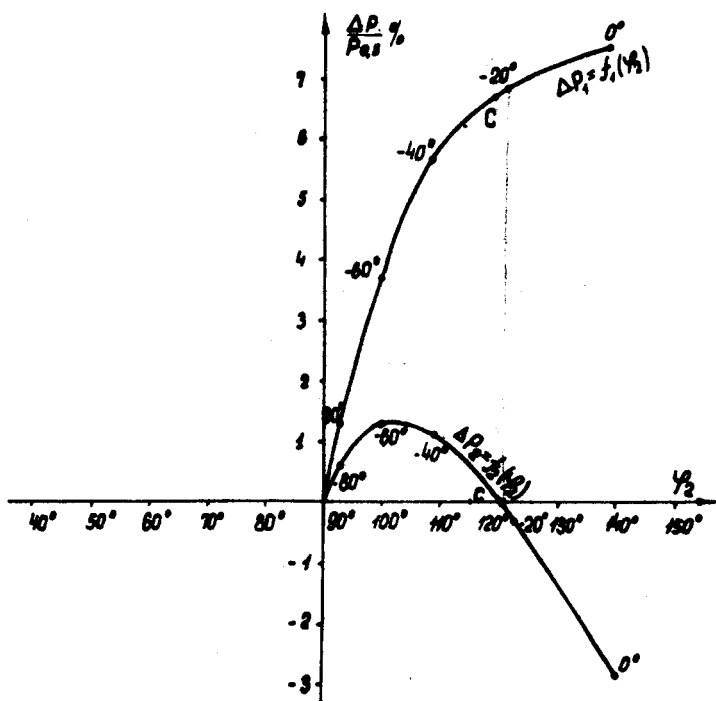


Рис. 3. Кривые разброса по импульсам группированных частиц.

При этом, поскольку  $\cos \phi_2 < \cos \phi_1$ , то должно быть выполнено условие

$$U_2 T_2 > U_1 T_1.$$

Аналогичные рассуждения можно привести для других частиц, поступающих на вход 1-го зазора группирователя с другими фазами, например, для частицы В (рис. 2).

Таким образом, несинхронные частицы получают в первом зазоре группирователя большой дополнительный (в отличие от синхронных) прирост энергии (положительный или отрицательный) вследствие чего большие фазирующие силы стягивают их фазу к синхронной фазе во втором зазоре группирователя, второй же зазор группирователя производит выравнивание всех сгруппированных частиц к энергии синхронной частицы, оставляя их фазу неизменной в плоскости электрического центра второго зазора группирователя. Для некоторой фазы (например, "С" рис. 3) после прохождения двух зазоров группирователя происходит полное выравнивание энергии, т.е.

$$\Delta W_c = W_c - W_s = 0.$$

Ниже приведены данные двухзазорного группирователя, который предполагается установить перед входом в линейный ускоритель протонов (ЛУ-20) на энергию 20 Мэв с жесткой фокусировкой в ЛВЭ ОИЯИ.

$E = 20$  кв/см  $L_1 = 8,4$  см  $L_2 = 11,06$  см  $T_1 = 0,5$   $T_2 = 0,7$ ,  
апертура в первом зазоре  $2a_1 = 3,48$  см, во втором зазоре  $2a_2 = 2$  см,  
длина первого зазора  $g_1 = 2,4$  см, длина второго зазора  $g_2 = 2,17$  см,  
 $l = 15$  см (пространство дрейфа от электрического центра 2-го зазора группирователя до электрического центра 1-го ускоряющего промежутка линейного ускорителя)  $\beta_{s,0} = 0,0348$  ( $W_{\text{форинж.}} = 0,57$  Мэв).

На рис. 3 показаны кривые разброса по импульсам группируемых частиц в координатах  $(\frac{\Delta p}{p_{s,0}}\%, \phi_2)$ , где  $\phi_2$  - фаза частицы во втором зазоре группирователя.

Кривая  $\Delta p_1 = f_1(\phi_2)$  характеризует разброс по импульсам частиц после их прохождения первого зазора группирователя в функции их положения во 2-ом зазоре группирователя.

Кривая  $\Delta p_2 = f_2(\phi_2)$  характеризует разброс по импульсам частиц после их прохождения 2-го зазора группирователя.

На кривых не указана вторая область фаз, которая практически является зеркальным отображением относительно начала координат. На кривых рис. 3 в градусах указаны фазы частиц при прохождении ими электрического центра 1-го зазора группирователя.

Следует отметить следующее. Из кривых рис. 1 видно, что даже при больших токах группируемого пучка (порядка 750 ма), но при малых пространствах дрейфа (10-20 см), т.е. когда силы пространственного заряда еще не успевают существенно повлиять на характер движения дрейфующих частиц, расчёт динамики частиц в системе 2-зазорного группирователя можно проводить без учёта сил пространственного заряда. Поэтому кривые рис. 4, рассчитанные без учёта сил пространственного заряда, с достаточной степенью точности отображают картину дрейфа для токов группируемого пучка 750 ма и выше.

На рис. 4 показано семейство кривых группировки частиц по фазам после прохождения ими 2-го зазора группирователя при нестабильности импульса инжектируемого пучка в пределах  $\frac{\Delta p}{p_{s,0}} = \pm 0,5\%$ .

На рис. 5 показана сепаратрисса линейного ускорителя ЛУ-20 в координатах  $\frac{\Delta p}{p}\%, \phi$  (кривая 1).

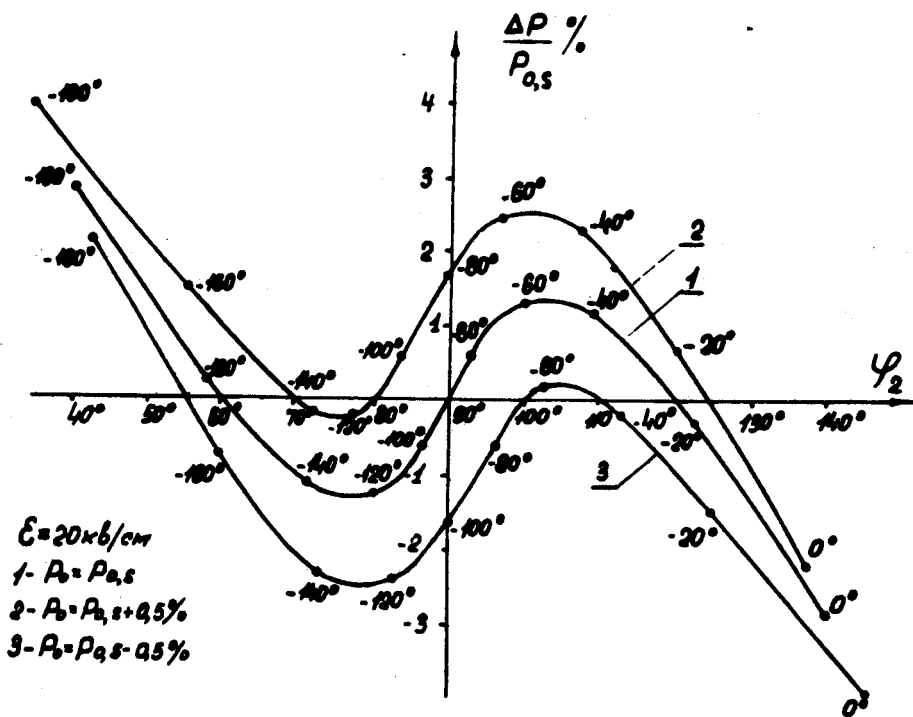


Рис. 4. Кривые группировки частиц по фазам после 2-зазора группирователя при нестабильности по импульсам инжектируемого пучка в пределах  $\pm 0,5\%$ .

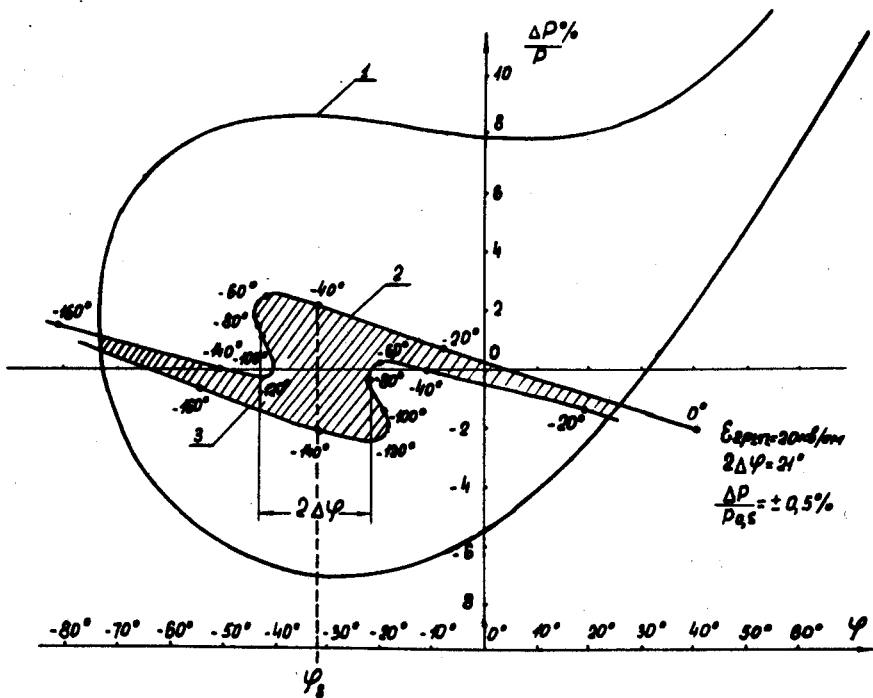


Рис. 5. Сепаратриса линейного ускорителя ЛУ-20 (кривая 1) и положение сгруппированных частиц внутри сепаратрисы.

Кривая 2 - положение сгруппированных частиц внутри сепартрисы после их дрейфа на участке от электрического центра 2-го зазора группирователя до электрического центра первого ускоряющего промежутка ЛУ-20 при  $\frac{\Delta p}{p_{s,0}} = +0,5\%$  (пространство дрейфа  $l = 15$  см).

Кривая 3 - соответственно при  $\frac{\Delta p}{p_{s,0}} = -0,5\%$ . На кривых 2,3 указаны фазы частиц, при которых они проходят 1-ый зазор группирователя.

Из кривых видно, что при применении 2-зазорного группирователя с трубкой дрейфа центр тяжести сгруппированного пучка смещается (в данном конкретном примере) не более чем на  $\Delta\phi = \pm 10,5^\circ$  относительно синхронной фазы  $\phi_s$  при разбросе по импульсам инжектируемого пучка, равном  $\pm 0,5\%$ .

Простой расчёт показывает, что при применении клистронного группирователя с пространством дрейфа  $l = 1,2$  м при том же разбросе по импульсам инжектируемого пучка его центр тяжести смещается соответственно на  $\Delta\phi = \pm 28^\circ$ .

Таким образом, двухзазорный группирователь с трубкой дрейфа существенно менее чувствителен к нестабильности по импульсам пучка, инжектируемого из форинжектора.

### Совмещенный 2-зазорный группирователь /8/

Описанный выше 2-зазорный группирователь с трубкой дрейфа, как и однозазорный клистронный группирователь, обладает тем недостатком, что конструктивно он выполнен как отдельное устройство и поэтому для своей работы требует отдельного источника питания, отдельного фазирующего устройства и отдельного ввода высокочастотной мощности в резонансный объем группирователя. Все это создает определенные технические трудности при разработке группирующих устройств.



Если 2-зазорный группирователь с трубкой дрейфа конструктивно выполнить как единое целое с резонатором линейного ускорителя, ускоряющая структура которого является обычной структурой типа Альвареца, то можно придти к схеме совмещенного группирователя, которая изображена на рис. 6.

На рис. 6а участок I представляет собой 2-зазорный группирователь с трубкой дрейфа, участок II является ускоряющей структурой протонного линейного ускорителя.

Таким образом, ускоряющая структура линейного ускорителя является естественным продолжением 2-зазорного группирователя, поскольку и группирователь и ускоряющая структура линейного ускорителя размещены в одном резонаторе.

В этом случае, естественно, отпадает необходимость в отдельном питании и фазировке группирователя, так как это выполняется автоматически при возбуждении резонатора на волне типа  $E_{010}$ .

Пространство свободного дрейфа сгруппированных частиц после 2-зазорного совмещенного группирователя определяется расстоянием между электрическим центром 2-го зазора группирователя и электрическим центром 1-го ускоряющего зазора структуры линейного ускорителя, которое в рассматриваемой схеме может быть сведено к минимуму (рис. 6б).

Расстояние между электрическими центрами зазоров группирователя

$$L = k_1 \beta_{s,0} \lambda ,$$

где  $k_1 = 1,5; 2,5; 3,5$  и т.д.

В общем случае значение  $k_1$  зависит от энергии инжекции и напряженности электрического поля на оси резонатора. Например, для обычных значений  $\beta_{s,0} = 0,035-0,04$ ,  $E = 20$  кВ/см,  $\lambda = 2$  м вполне приемлемым является значение  $k_1 = 1,5$ .

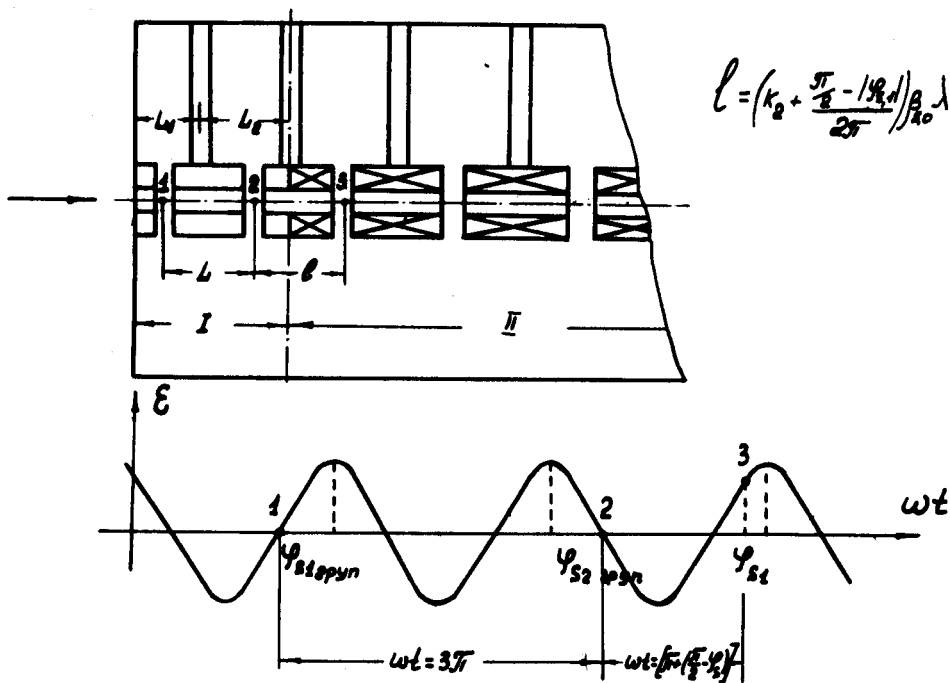


Рис. 6. Двухзазорный группирователь, совмещенный с ускоряющей структурой линейного ускорителя.

Расстояние между электрическим центром 2-го зазора группирователя и 1-м ускоряющим зазором

$$l = \left( k_2 + \frac{\pi/2 - |\phi_{s,1}|}{2\pi} \right) \beta_{s,0} \lambda,$$

где  $\phi_{s,1}$  - значение синхронной фазы линейного ускорителя,  $k_2$  может принимать значения 0,5; 1,5; 2,5 и т.д. Например, для ЛУ-20 ( $\beta_{s,0} = 0,0348$ ,  $\lambda = 2,08$  м,  $\phi_s = 31,5^\circ$ ) получим  $L = 10,86$  см ( $k_1 = 1,5$ ) и  $l = 4,795$  см ( $k_2 = 0,5$ ).

### Некоторые экспериментальные результаты работы линейного ускорителя ионов с совмещенным группирователем

Обычная уже рассчитанная ускоряющая структура линейного ускорителя ионов, в которой резонансное ускорение начинается с 1-го ускоряющего промежутка, позволяет в принципе осуществить вариант совмещенного двухазорного группирователя (рис. 6), если есть возможность увеличить энергию пучка форинжектора до нужной величины.

На синхрофазотроне ОИЯИ в настоящее время реализуется метод ускорения дейтонов и  $\alpha$ -частиц, описанный в работах <sup>7,8/</sup>. В качестве инжектора дейтонов используется протонный линейный ускоритель с сеточной фокусировкой, который при ускорении дейтонов и  $\alpha$ -частиц переводится в режим двойной кратности дрейфа ускоряемых частиц, причем напряжение на ускорительной трубке форинжектора понижается до 285 кв. При таком напряжении резко ухудшаются параметры инжектируемого пучка, в результате дейтонный ток на выходе линейного ускорителя также снижается. При напряжении 285 кв на ускорительной трубке форинжектора на выходе линейного ускорителя был получен дейтонный ток порядка 200 мка в импульсе. В связи с тем, что в данном случае

существует определенная возможность поднять напряжение на ускорительной трубке форинжектора, было реализовано два варианта совмещенного 2-зазорного группирователя.

### I вариант. Инжекция в 3-й зазор ускоряющей структуры

В этом случае первые две трубки дрейфа были сняты и заменены новыми с тем расчётом, чтобы два первых зазора выполняли функцию двухзазорного группирователя. Требуемое напряжение инжекции возросло до 400 кв. При этом инжектируемый ток на входе в апертуру линейного ускорителя возрос в два раза, а ускоренный ток на выходе линейного ускорителя возрос в 4 раза (800 мка), т.е. ожидаемый эффект увеличения ускоренного тока в 2 раза от действия группирователя был получен экспериментально.

### II вариант. Инжекция в 5-й зазор ускоряющей структуры

В этом случае первые четыре трубки ускоряющей структуры были сняты и заменены новыми с таким расчётом, чтобы 3-й и 4-ый зазоры выполняли функции группирователя, а для первых двух зазоров фактор пролетного времени был выбран равным нулю. Поэтому первые два зазора частицами "пропускались" без изменения их начальной энергии, в 3-м, 4-м зазорах они группировались, а резонансное ускорение начиналось с 5-го зазора. Требуемое напряжение инжекции при этом возросло до 525 кв, ток на входе в апертуру линейного ускорителя возрос в 2,5-3 раза, а ускоренный ток на выходе линейного ускорителя возрос в 6 раз (1200 мка).

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность Л.П. Зиновьеву, А.Б. Кузнецову, В.И. Морозу за полезные дискуссии и постоянный интерес к работе; Л.С. Русаковой за помощь в проведении расчётных работ, а также Д.И. Шерстянову, В.И. Хренову, П.Г. Се-робабе за помощь в проведении экспериментальных работ.

## Л и т е р а т у р а

1. И.М. Капчинский, В.К. Плотников. ПТЭ №5, 1967.
2. В.А. Баталин и др. ПТЭ №5, 1967.
3. В.И. Герман и А.С. Компанец. Теория группирователя. ЖТФ т. вып. 3 (1956).
4. Ю.Д. Безногих. Способ группирования по фазам заряженных частиц на входе линейного ускорителя ионов. Заявка № 1390627/26-25.
5. Ю.Д. Безногих. Высокочастотный группирователь (банчер) заряженных частиц. Заявка № 1389669/26-25.
6. Ю.Д. Безногих. Линейный ускоритель ионов с предварительной группировкой по фазам частиц, поступающей из форинжектора. Заявка № 1390644/26-25.
7. Ю.Д. Безногих, Л.П. Зиновьев и др. Препринт ОИЯИ Р9-4214, Дубна 1968.
8. Ю.Д. Безногих, Л.П. Зиновьев и др. ПТЭ, №4, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел

22 июля 1970 года.