

Рис. 5. Зависимость потенциала плазмы $U_{пл}$ от радиуса замагниченной плазменной струи.

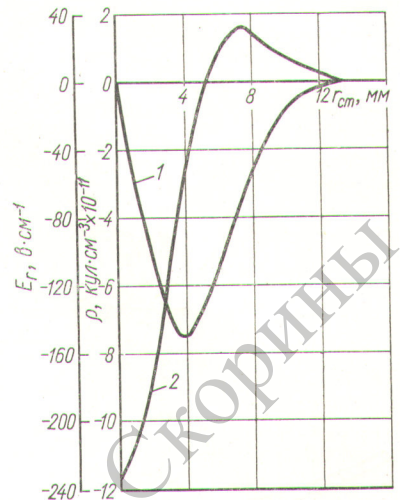
Изменением потенциала по азимуту и вдоль струи пренебрегали. Получено соотношение ρ ($\kappa/см^3$) = $-1,15 \cdot 10^{-10} (1 - 0,036 r_{ст}^2) e^{-0,036 r_{ст}^2}$ (см. рис. 6, кривая 2). Объемный заряд в центральной части струи отрицательный, а в периферийной части — положительный.

При анализе зависимости параметров замагниченной плазмы, находящейся в вакууме, от параметров дугового разряда была обнаружена примерная пропорциональность плотности заряженных частиц разрядному току, а электронной температуры — напряжению на разряде.

В процессе зондовых измерений наблюдались флуктуации зондового тока с частотой от сотен килогерц до десятков мегагерц, которые возрастали с удалением от центра плазменной струи. При определенных соотношениях тока дуги, магнитного поля и давления в дуговой камере возникали резонансные звуковые колебания с частотой порядка 2 кГц.

Подобные струи замагниченной плазмы использовались для первоначального формирования пучков ионов водорода с током 600—800 мА, энергией 30—40 кэВ

Рис. 6. Зависимость электрического поля (1) и плотности объемного заряда (2) от радиуса замагниченной плазменной струи, находящейся в вакууме.



и эквивалентным электронным первеансом до $5 \times 10^{-6} a/e^{-3/2}$ [2].

Авторы приносят благодарность Г. Ф. Лощенкову, Б. М. Безверхову и А. С. Власову за помощь в подготовке и проведении измерений; Д. В. Каретникову и Б. К. Шембелю за полезные дискуссии; Л. К. Пятикобову, А. С. Алимову и Е. М. Морозову за разработку и изготовление генератора пилообразных импульсов.

Поступило в Редакцию 12/I 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Д. Г а б о в и ч. Плазменные источники ионов. Киев, «Наукова думка», 1964.
2. Н. В. П л е ш и в ц е в и др. Применение замагниченной плазмы для формирования интенсивных пучков ионов. Plasma Physics, 1967 (в печати).
3. D. V o h m et al. The characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields, Ch. III, IX, N. Y., 1949.
4. М. Д. Г а б о в и ч, Л. Л. П а с е ч н и к, Е. А. Л о з о в а я. ЖТФ, 31, 1049 (1961).

Внешняя инжекция в микротрон сгруппированного электронного сгустка

А. М. ГРОМОВ

УДК 621.384.611.3

Одним из недостатков метода инжекции электронов в микротрон, при котором используется подогревный катод, расположенный в ускоряющем резонаторе, является низкий коэффициент полезного использования ВЧ-мощности [1, 2]. Это связано с тем, что в режим ускорения захватывается небольшая доля (~1/30) полного тока катода. Остальные электроны нагружают резонатор и бесполезно уносят значительную долю ВЧ-мощности, что ограничивает интенсивность микротрона. Кроме того, наличие катода отрицательно влияет на электрическую прочность резонатора. Эффективность микротрона (доля захваченных электронов) может

быть увеличена, если в ускоряющий резонатор инжектировать сгусток электронов, который предварительно сгруппирован по фазе и энергии. Однако расположить группирователь в области, где находится катод, очень сложно, так как эта область мала и ограничена резонатором и первой орбитой электронов. Для вынесения группирователя за пределы области, охваченной орбитами электронов, предлагалось использовать электростатический инфлектор [3]. Однако для осуществления этого метода требуется высокая напряженность электрического поля на инфлекторе. Это ограничивает диапазон плавной регулировки выходной энергии электронов.

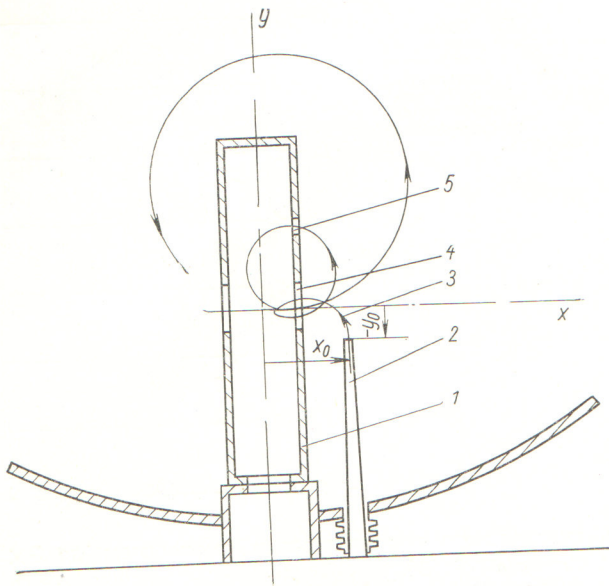


Рис. 1. Схема внешней инжекции в микротрон: 1 — ускоряющий резонатор микротрона; 2 — антимагнитный канал; 3 — траектория электронов; 4 — выходное отверстие резонатора; 5 — дополнительное отверстие в стенке резонатора

Если электроны инжектировать со стороны выходного отверстия резонатора, то необходимость в инфлекторе отпадает. В этом случае инжектор выносится за пределы ведущего поля микротрона и электроны подводятся к точке инжекции при помощи антимагнитного канала. Предускоритель-группирователь может иметь катод с большой эмиттирующей поверхностью и собственную фокусирующую электронно-оптическую систему. Это позволит получить хорошо сгруппированный пучок электронов с высокой плотностью тока, который почти целиком будет захватываться в режим ускорения.

Схема осуществления внешней инжекции показана на рис. 1. Предускоритель-группирователь вынесен за пределы ведущего магнитного поля. Магнитное поле, заворачивающее электроны, направлено за плоскость рисунка. Предварительно сгруппированные, ускоренные и сфокусированные электроны при помощи антимагнитного канала подводятся к точке инжекции с координатами x_0 и $-y_0$. Энергия электронов, направление, координаты их вылета из антимагнитного канала и фаза подбираются такими, чтобы, описав дугу, электроны попадали в резонатор через выходное отверстие и тормозились электрическим полем. После этого электроны будут двигаться в обратном направлении и выйдут из резонатора. Энергия отразившихся электронов еще недостаточна для того, чтобы обогнуть резонатор, и они снова возвратятся в него через дополнительное отверстие в стенке резонатора. При правильной выбранной фазе и начальной энергии электроны

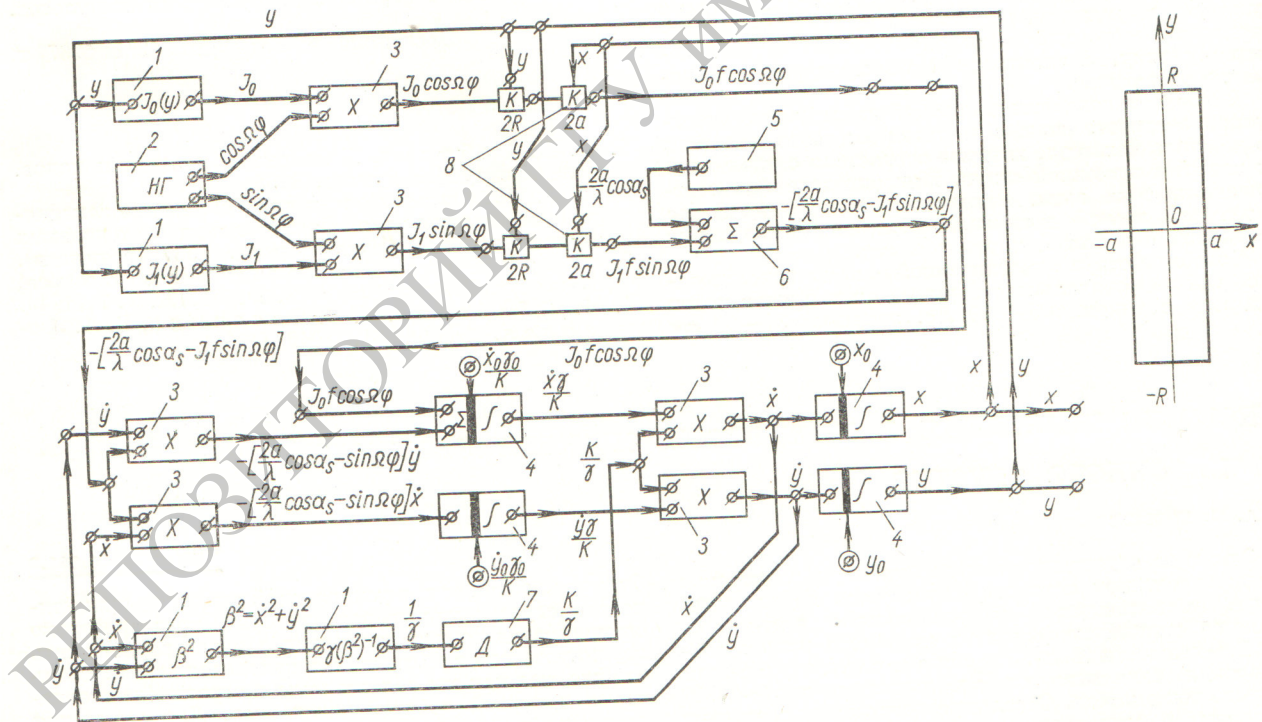


Рис. 2. Блок-схема решения уравнений движения электронов в микротрон на аналоговой машине: 1 — блоки, воспроизводящие нелинейные функциональные зависимости; 2 — низкочастотный генератор; 3 — блоки перемножения функций; 4 — блоки интегрирования; 5 — блок эталонных напряжений; 6 — блок суммирования функций; 7 — блок умножения функции на постоянный коэффициент; 8 — ключи, замыкающие цепь, когда электрон находится внутри резонатора, и разрывающие, когда электрон выходит из резонатора.

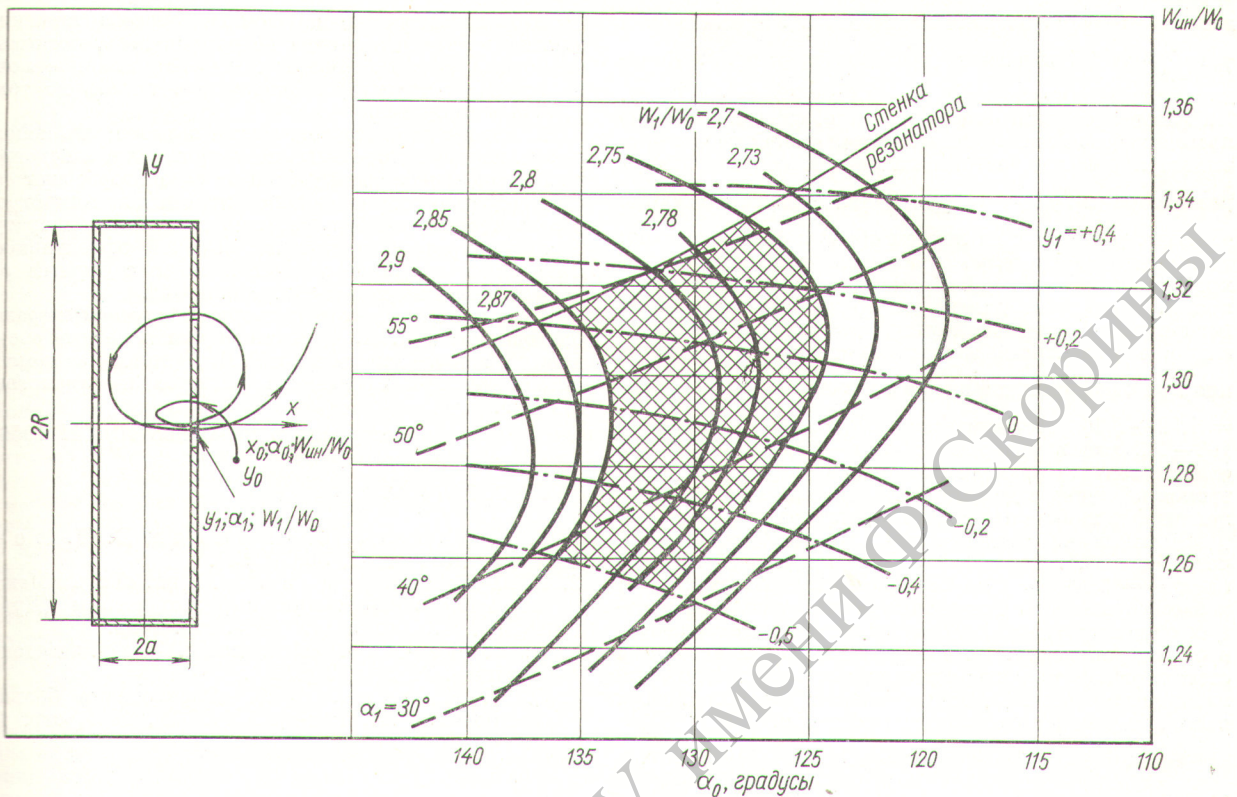


Рис. 3. Область захвата электронов в режим ускорения:

x_0, y_0, α_0 и $\frac{W_{ин}}{W_0}$ — начальные координаты; фаза и полная относительная энергия инжекции электронов; y_1, α_1 и $\frac{W_1}{W_0}$ — вертикальная координата, фаза и полная относительная энергия электронов на первом обороте в выходном отверстии резонатора.

после вторичного прохождения резонатора захватываются в режим синхронного ускорения.

Этот способ инжекции был исследован на аналоговой математической машине МН-7 в комбинации с низкочастотным генератором НГК-3 и двумя комплектами нелинейных блоков НБН-1. Расчеты проводились для ускоряющего резонатора цилиндрической формы.

Уравнения движения, которые моделировались на машине, имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{z} - \dot{x}_0 &= -\frac{K}{\gamma} \int_{\varphi_0}^{\varphi} \left[\left(\frac{2a}{\lambda} \cos \alpha_s - I_1 f \sin \Omega \varphi \right) \dot{y} + \right. \\ &\quad \left. + I_0 f \cos \Omega \varphi \right] d\varphi; \\ \dot{y} - \dot{y}_0 &= \frac{K}{\gamma} \int_{\varphi_0}^{\varphi} \left(\frac{2a}{\lambda} \cos \alpha_s - I_1 f \sin \Omega \varphi \right) \dot{x} d\varphi, \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{1 - (\dot{x}^2 + \dot{y}^2)}; \quad \Omega = K \frac{2a}{\lambda} \cdot \frac{W_0}{W_s} \cos \alpha_s;$$

$$X_\phi = \lambda \Omega x; \quad Y_\phi = \lambda \Omega y; \quad t_\phi = F \Omega \varphi;$$

$$\lambda = \frac{\lambda}{2\pi}; \quad F = \frac{T}{2\pi}.$$

Здесь X_ϕ, Y_ϕ и t_ϕ — физические координаты и время ускоряемой частицы; x, y и φ — машинные координаты и фаза движения частицы; λ и T — длина волны и период высокочастотного ускоряющего поля; W и W_0 — полная энергия и энергия покоя частицы; W_s и α_s — полная равновесная энергия и равновесная фаза частицы; I_0 и I_1 — функция Бесселя нулевого и первого порядка; f — функция, равная единице, когда частица находится внутри резонатора, и нулю, если она находится вне резонатора; a — полуширина резонатора; $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0$ и $W_{ин}$ — координаты, составляющие скорости и энергия частицы в момент вылета из антимагнитного канала; K — масштабный коэффициент.

Блок-схема модели приведена на рис. 2. Изменение параметров электрона в процессе инжекции записывалось на шлейфном осциллографе Н700. Осциллограммы снимали для различных фаз и энергий инжектируемых электронов и по ним строили траектории и фазовые области захвата.

На рис. 3 показана фазовая область для случая, когда толщина резонатора $2a = 2$ см, длина волны ускоряющего напряжения $\lambda = 10$ см, отношение равно-

весного прироста энергии электрона к энергии покоя $\gamma_s \equiv \frac{W_s}{W_0} = 1,4$ и равновесная фаза $\alpha_s = 51,6^\circ$. Координаты точки инжекции: $X_{\text{оф}} = 2,1 \text{ см}$; $Y_{\text{ф}} = -0,64 \text{ см}$. На фазовой области нанесены линии, соответствующие постоянным значениям фазы, вертикальной координате вылета и энергии частицы на первом обороте вокруг резонатора ($\alpha_1, y_1, \frac{W_1}{W_0} \equiv \gamma_1$). Захваченными считаются частицы, у которых на первом обороте фаза и энергия не выходят за пределы, ограничивающие область синхронного ускорения [1]. Кроме того, частицы должны пройти достаточно далеко от точки инжекции и не погибнуть на внутренней стенке резонатора. На рис. 2 видно, что электроны захватываются в режим ускорения при относительной энергии инжекции $\gamma_{\text{ин}} = \frac{W_{\text{ин}}}{W_0} =$

$= 1,32 \div 1,26$ (кинетическая энергия инжекции $163-133 \text{ кэВ}$) в интервале фаз от -125 до -135° . Эта область захвата практически одинакова для всех электронов из пучка с диаметром 1 мм на выходе из антимагнитного канала при угленом растворе до $5 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$. Были сняты также осциллограммы для случая, когда $\gamma_s = 3,1$. Это соответствует индукции ведущего поля $B = 0,33 \text{ тл}$ (3300 эс). Измерения показали, что и здесь существует достаточно большая область входных параметров, из которой электроны захватываются в режим ускорения. Во всех случаях точка инжекции отстоит от орбит электронов настолько, что возмущения магнитного поля, которые вносит антимагнитный канал, не влияют на процесс ускорения.

При исследовании описанного способа инжекции влияние объемного заряда не учитывалось, поскольку оценочные расчеты показали, что это влияние почти не искажает траектории электронов вплоть до токов 100 ма в импульсе.

В связи с тем, что появляется возможность использовать на резонаторе высокие напряжения, а подогретый катод может быть удален от резонатора, этот способ, вероятно, особенно перспективен для микротрона с резонатором, охлаждаемым до гелиевых температур. Такой микротрон вследствие высокой эффективности привлекает внимание ученых в связи с бурным развитием техники сверхпроводников [4].

В заключение автор пользуется случаем выразить благодарность К. А. Беловинцеву за полезные обсуждения и ценные замечания и Г. И. Данилову за помощь, оказанную при проведении расчетов на аналоговой машине.

Поступило в Редакцию 16/XII 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. П. Капица, В. П. Быков, В. Н. Мелехин. ЖЭТФ, 41, 368 (1961).
2. К. А. Беловинцев и др. В кн. «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963)». М., Атомиздат, 1964, стр. 1055.
3. Б. З. Кантер. «Изв. высш. учебн. заведений. Физика», № 3, 138 (1960).
4. С. П. Капица. В сб. «Электроника больших мощностей». М., Изд-во АН СССР, 1965, стр. 178.

Расчетные спектры нейтрино, образованных протонами с энергией 70 Гэв

Н. В. АЛЕКСЕЕВ, С. С. ГЕРШТЕЙН, В. Н. ФОЛОМЕШКИН

УДК 539.123

Для понимания природы слабого взаимодействия большое значение имеют результаты экспериментов с нейтрино высоких энергий. На больших зарубежных ускорителях уже получены первые результаты. Для продолжения этих интересных исследований необходимо повысить интенсивность и энергию нейтринного пучка. Такие возможности появляются с улучшением действующих и сооружением новых протонных ускорителей на более высокие энергии.

Свойства нейтринного пучка определяются энергией первичных протонов и условиями его формирования. Одним из существенных условий получения интенсивного потока является фокусировка мезонов в широком интервале энергий и углов вылета. В ЦЕРНе фокусировка была выполнена с помощью магнитного

горна [1]. В настоящей работе изучена эффективность этого устройства для энергии 70 Гэв — проектная энергия ускорителя протонов, сооружаемого в Институте физики высоких энергий.

На рис. 1 схематически показан рассмотренный вариант получения нейтринного пучка. Узкий протонный пучок от ускорителя падает на медную мишень, имеющую форму цилиндра размером $5 \times 30 \text{ мм}$. В ней под действием протонов возникают π - и k -мезоны. За мишенью на расстоянии около 1,5 м устанавливается фокусирующий горн. Для выбранного на рисунке направления тока магнитное поле горна отклоняет к оси положительно заряженные мезоны, а отрицательные, наоборот, дефокусируются.

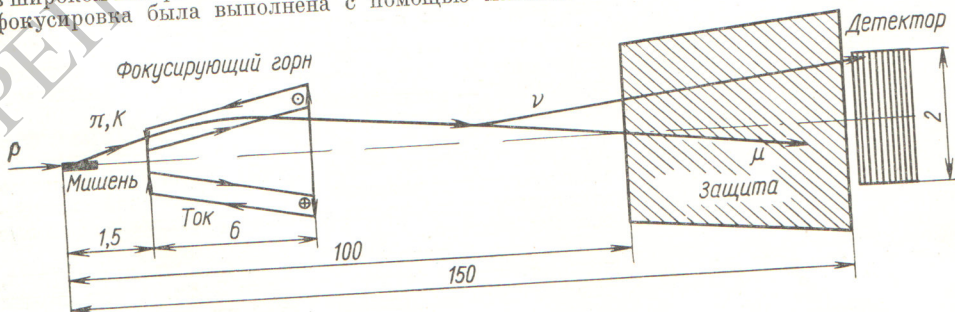


Рис. 1. Схема формирования нейтринного пучка (размеры даны в метрах).