

# Система монохроматизации внешнего пучка 2,4-метрового изохронного циклотрона

Ю. Г. БАСАРГИН, В. И. БОГДАНОВА, Н. И. ВЕНИКОВ,  
К. Н. КОРОЛЬ, Н. Н. ПОСЕЛЬСКИЙ, Ю. П. СЕВЕРГИН

УДК 621.384.633

На изохронных циклотронах с регулируемой энергией достигнута энергетическая неоднородность выведенного пучка около  $2 \cdot 10^{-3}$ , причем это требует тщательной настройки магнитного поля, стабилизации ускоряющего напряжения и формирования в центральной области узкой полосы фаз ускоряемых ионов. Дальнейшее улучшение энергетической неоднородности пучка на мишенях осуществляется путем прецизионного магнитного анализа с уменьшением интенсивности в десятки раз.

С другой стороны, существует принципиальная возможность значительно уменьшить энергетический разброс циклотронного пучка без потери его интенсивности, если использовать методы, разработанные ранее для линейных ускорителей. Такая возможность была отмечена в сообщении [1], а в работе [2] предварительно рассмотрен вариант схемы монохроматизации, который был взят за основу при проектировании лабораторий изохронного циклотрона в ИАЭ им. И. В. Курчатова.

**Высокочастотная компенсация энергетического разброса при продольной сепарации частиц по импульсам.** Схема ВЧ-компенсации стала классической в линейных ускорителях протонов. На расстоянии  $L$  от линейного ускорителя ставится дополнительный резонатор (так называемый дебанчер), работающий на той же длине волны  $\lambda$ , что и резонаторы ускорителя. При наибольшем разбросе импульсов частиц на выходе линейного ускорителя  $\pm \frac{\Delta p_m}{p_0}$  на базе пролета  $L$  за счет разности скоростей осуществляется продольная сепарация частиц по импульсам. При подлете к ускоряющей щели дебанчера центры тяжести микросгустков моноэнергетических частиц сдвигаются по фазе на предельную величину:

$$\varphi_m = \frac{2\pi L}{\gamma^2 \beta \lambda} \cdot \frac{\Delta p_m}{p_0}, \quad (1)$$

где

$$\gamma^2 = \frac{1}{1 - \beta^2}.$$

Дебанчер сфазирован таким образом, что частицы с импульсом  $p_0 + \Delta p$  замедляются, с импульсом  $p_0 - \Delta p$  — ускоряются, благодаря чему происходит частичная компенсация энергетического разброса.

В протонных линейных ускорителях база пролета  $L$  составляет несколько десятков метров, в циклотроне же это расстояние будет около 1 км из-за меньшего исходного разброса импульсов и большей величины  $\lambda$ . Таким образом, непосредственное использование классической схемы ВЧ-компенсации в случае циклотронного пучка непрактично.

Продольная сепарация частиц по импульсам может быть достигнута не только за счет разности скоростей при прямолинейном дрейфе, но и благодаря разности длин осевых траекторий для частиц разных импульсов в поворотных магнитооптических системах [3]. Применение подобного способа позволяет существенно сократить габариты системы монохроматизации и в случае циклотронного пучка [2].

Эффективность компенсации ухудшается из-за конечной фазовой ширины  $2\Delta\varphi_0$  моноэнергетических сгустков непосредственно перед дебанчером и из-за нелинейности его ВЧ-напряжения. На рис. 1 показаны зависимости коэффициента улучшения энергетического разброса  $\eta$  от предельной фазы  $\varphi_m$  для разных значений

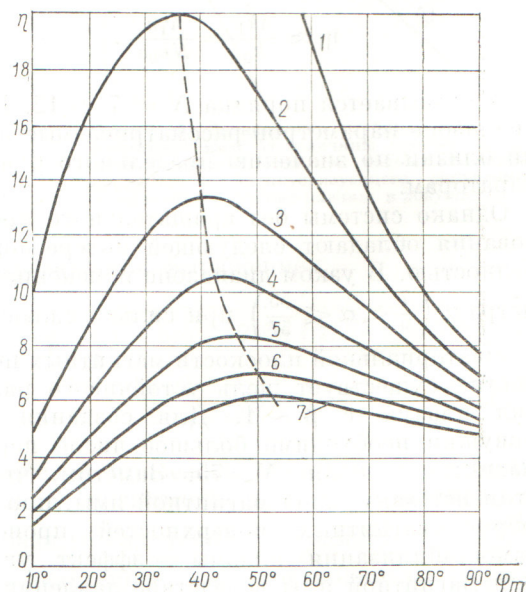


Рис. 1. Зависимости коэффициента улучшения энергетического разброса от предельной фазы при различных  $2\Delta\varphi_0$ :

1 — 0°; 2 — 2°; 3 — 4°; 4 — 6°; 5 — 8°; 6 — 10°; 7 — 12°.

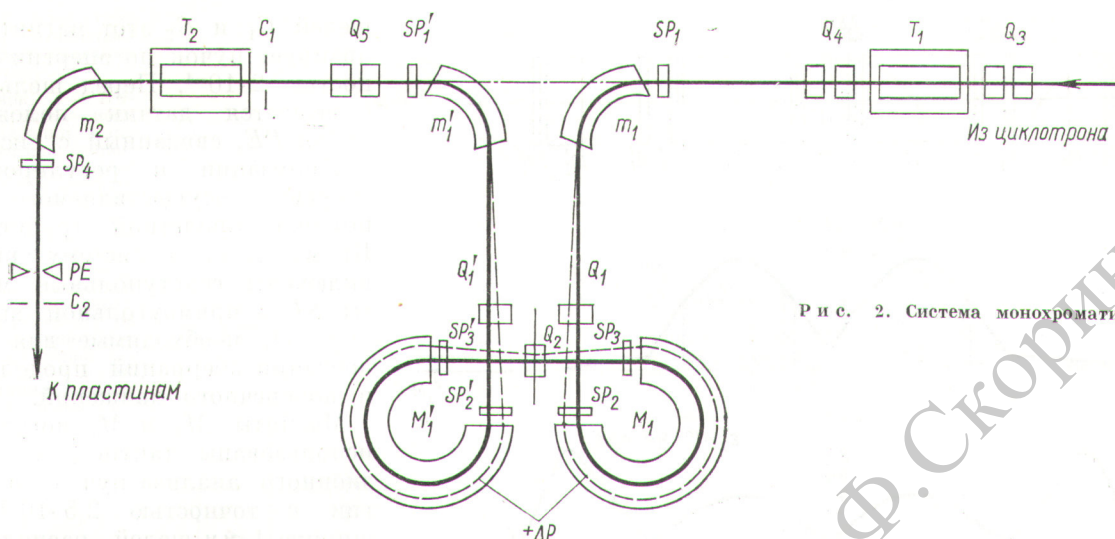


Рис. 2. Система монохроматизации.

ний  $2\Delta\varphi_0$ . Видно, что оптимальная величина  $\varphi_m$  определяется фазовой шириной  $2\Delta\varphi_0$ . Десятикратное уменьшение энергетического разброса может быть достигнуто при  $\varphi_m = 40 \div 50^\circ$ , если  $2\Delta\varphi_0 < 7^\circ$ .

С точки зрения увеличения достигаемой величины  $\eta$  предпочтительны такие системы продольной сепарации по импульсам, которые не увеличивали бы фазовой ширины моноэнергетических сгустков на пути от ускорителя до дебанчера. В линейном приближении такому требованию удовлетворяет классическая схема с прямолинейным дрейфом. Из магнитооптических систем трактам с прямолинейной осью аналогичны по свойствам ахроматичные поворотные системы, в которых в линейном приближении также сохраняется длина моноэнергетических сгустков и поперечный эмиттанс немонотонно энергетического пучка [4, 5].

В случае систем с криволинейной осью продольная сепарация может быть охарактеризована эффективной длиной  $\tilde{L}$ , учитываемой формулой (1), причем

$$\tilde{L} = L_0 - \gamma^2 L^* \quad (2)$$

Здесь  $L_0$  — длина оси системы между ускорителем и дебанчером;  $L^* = \int_0^{L_0} \frac{D}{\rho} ds$ , где  $D(s)$  — функция дисперсии пучка в системе [4];  $\rho(s)$  — радиус кривизны оси системы.

**Описание системы компенсации энергетического разброса.** Параметры системы соответствуют требованию монохроматизации пучка циклотрона У-240 [6] с максимальной энергией протонов 100 Мэв. Система изображена на

рис. 2. Основой являются симметричная ахроматичная система поворота пучка на угол  $4\pi$  и дебанчер  $T_2$ . Пролетная трубка дебанчера с двумя ускоряющими зазорами имеет длину  $\pi r_K = \frac{1}{2} q \beta \lambda$ , где  $r_K$  — радиус последней орбиты в циклотроне;  $q$  — кратность ускорения (для циклотрона У-240  $r_K = 100$  см). Магниты  $m_1$  и  $m_1'$  с однородным полем и с краевой вертикальной фокусировкой ( $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 26,5^\circ$ ) отклоняют пучок каждый на  $90^\circ$ ; магниты  $M_1$  и  $M_1'$  с градиентной фокусировкой ( $n = 0,831$ ) отклоняют пучок каждый на  $270^\circ$ .

Магнит  $m_1$  создает начальное угловое отклонение дисперсной осевой траектории, которая на рис. 2 показана штриховой линией. Квадрупольная линза  $Q_1$  в горизонтальной плоскости дефокусирует, благодаря чему угол дисперсной траектории существенно увеличивается. Такая «раскачка» приводит к большой положительной величине  $D$  внутри магнитов  $M_1$  и  $M_1'$  и к соответственно большей абсолютной величине эффективной длины системы  $\tilde{L}$ . Квадрупольная линза  $Q_2$  симметризует дисперсную траекторию, что и обеспечивает ахроматичность системы. Поворотные магниты имеют радиус 2 м, эффективная длина квадрупольей 60 см. Магниты  $M_1$ ,  $M_1'$  предполагаются сходными со спектрометром [7].

Расстояние  $L_0$  вдоль оси системы около 100 м. Для протонов с энергией 100 Мэв рассчитанная эффективная база пролета  $\tilde{L} = -860$  м, что при  $\frac{\Delta p_m}{p_0} = 1 \cdot 10^{-3}$  дает  $\varphi_m \simeq 40^\circ$  и требует максимального напряжения 150 кВ на пролетной трубке дебанчера.

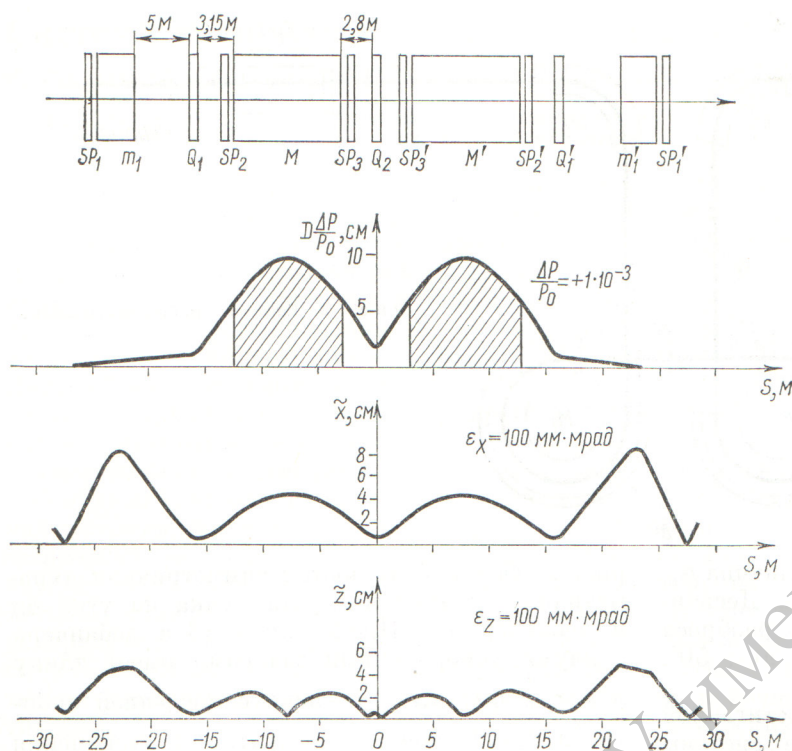


Рис. 3. Дисперсная траектория  $D$  и огибающие  $\tilde{x}$ ,  $\tilde{z}$  пучка.

Рис. 3 иллюстрирует оптические свойства системы в линейном приближении. Показаны длины прямолинейных промежутков между эффективными границами поворотных магнитов и квадрупольных линз. Дисперсная траектория  $D \frac{\Delta p}{p_0}$  приведена для  $\frac{\Delta p}{p_0} = +1 \cdot 10^{-3}$ .

Огибающие  $\tilde{x}$ ,  $\tilde{z}$  траекторий моноэнергетических частиц для горизонтального и вертикального движений вычерчены в предположении, что соответствующие эмиттансы  $\epsilon_{x,z} = 100 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ . Квадрупольные пары  $Q_3$  и  $Q_4$  (см. рис. 3) должны так сформировать пучок перед магнитом  $m_1$ , чтобы в середине линзы  $Q_2$  двумерные фазовые объемы имели форму прямого эллипса, причем для горизонтального движения полуоси эллипса подобраны на основании требования минимума огибающей внутри магнитов  $M_1$  и  $M'_1$ . Для вертикального движения подобное требование связано с апертурой магнитов  $m_1$  и  $m'_1$ .

После магнита  $m'_1$  квадрупольная пара  $Q_5$  должна сформировать пучок перед анализирующим магнитом  $m_2$  (см. рис. 2) с однородным полем и с краевой вертикальной фокусировкой ( $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 31^\circ$ ). При ширине 1 мм

щелей  $C_1$  и  $C_2$  этот магнит анализирует пучок по энергии с точностью  $2 \cdot 10^{-4}$ . Перед щелью  $C_2$  помещается датчик положения пучка  $PE$ , связанный с системой стабилизации и регулирования энергии, осуществляемого при помощи пролетной трубки  $T_1$ . Кроме того, в систему рис. 2 включены секступольные магниты  $SP$  с прямоугольной апертурой [7], необходимые для компенсации aberrаций продольного и поперечного движений.

Магниты  $M_1$  и  $M'_1$  могут быть использованы также для прецизионного анализа пучка по энергии с точностью  $2,5 \cdot 10^{-5}$  при ширине 1 мм щелей, расположенных в промежутках  $m_1 Q_1$  и  $Q'_1 m'_1$ . В этом режиме линзы  $Q_1$ ,  $Q'_1$ ,  $Q_2$  выключены и при помощи квадрупольных обмоток [7] в магнитах  $M_1$  и  $M'_1$  установлено  $n \simeq 0,95$ .

**Стабилизация и плавное регулирование энергии.** Нестабильности фазы пучка в циклотроне, фазы ВЧ-напряжения дебанчера, а также нестабильности магнитных по-

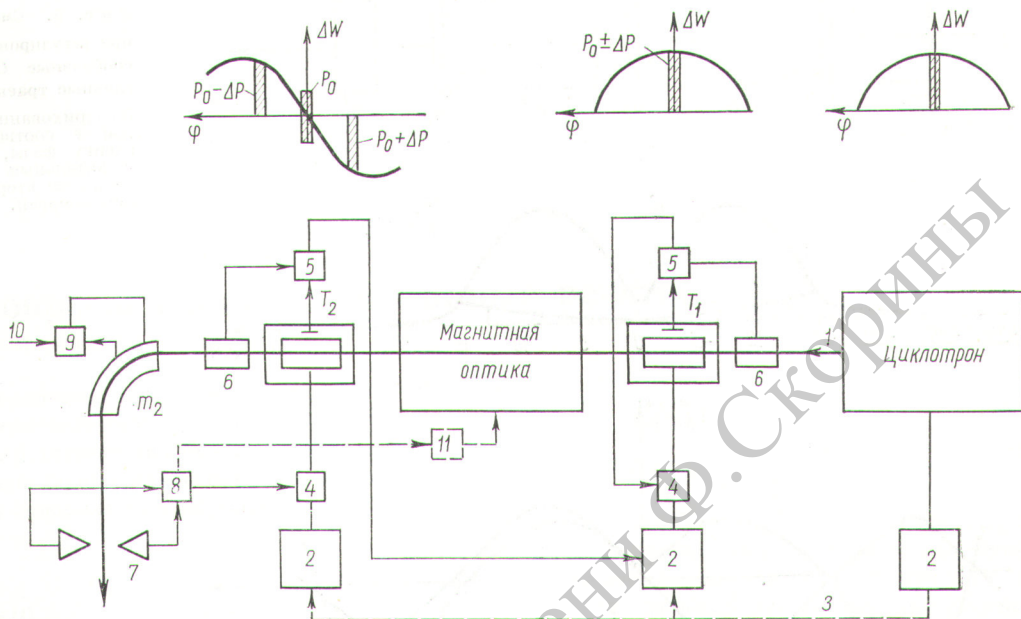
лей в элементах системы монохроматизации приводят к дрейфу средней энергии пучка на выходе системы.

На рис. 4 показана блок-схема системы стабилизации и регулирования энергии в небольших пределах без перестройки циклотрона и элементов схемы рис. 2, кроме анализирующего магнита  $m_2$ , который является управляющим элементом системы.

Энергия частиц определяется полем магнита  $m_2$ , которое стабилизируется и контролируется от датчика ЯМР. Нестабильность средней энергии приводит к смещению оси пучка магнита  $m_2$ , которое фиксируется дифференциальным датчиком положения пучка. Сигнал ошибки подается на фазовращатель дебанчера  $T_2$ , который в нужную сторону смещает фазу ВЧ-напряжения относительно центра тяжести сгустка. Изменяя поле в магните  $m_2$ , посредством этой обратной связи можно регулировать энергию, однако пределы регулирования весьма ограничены вследствие уменьшения коэффициента  $\eta$  из-за несимметричности фазовой полосы пучка ширины  $2(\varphi_m + \Delta\varphi_0)$  относительно  $\varphi = 0$ . Фаза центра тяжести сгустка может быть возвращена

Рис. 4. Блок-схема системы стабилизации и регулирования энергии:

1 — пучок; 2 — ВЧ-генераторы; 3 — цепи синхронизации и исходного фазирования; 4 — фазовращатели; 5 — фазовые детекторы; 6 — датчики фазы сгустков; 7 — дифференциальный датчик положения пучка; 8 — усилитель; 9 — цепь стабилизации и регулирования поля магнита  $m_2$  на основе датчика ЯМР; 10 — управление системой; 11 — источник питания корректирующих магнитов  $d$  и  $d'$ .



к нулевой, если соответственно изменить энергию на входе в систему при помощи еще одного резонатора с пролетной трубкой  $T_1$  (см. рис. 2). Это может быть сделано автоматически посредством второй независимой обратной связи, действующей на напряжение трубки  $T_1$  через фазовый детектор от датчиков фазы пучка и фазы напряжения дебанчера. Пределы регулирования энергии теперь ограничиваются напряжением на  $T_1$  и допустимым радиальным смещением осевой траектории пучка в магнитах  $M_1$  и  $M'_1$ . Кривая 1 на рис. 5 дает смещение  $X_{\Delta p_0}$  осевой траектории от оси системы при изменении среднего импульса на  $\frac{\Delta p_0}{p_0} = +1 \cdot 10^{-3}$ .

Был также рассмотрен второй режим стабилизации и регулирования энергии, когда сигнал дифференциального датчика положения пучка смещает в нужную сторону не фазу дебанчера относительно сгустка, а фазу сгустка относительно ВЧ-напряжения дебанчера. Для этого необходимо варьировать эффективную длину  $\tilde{L}$  системы, что достигается средствами магнитной оптики. Во втором режиме сигнал воздействует на источник питания коротких корректирующих магнитов  $d$  и  $d'$ , схематично показанных на рис. 5. Магнит  $d$  создает возмущение осевой орбиты для частиц с импульсом  $p_0$ , изменяя соответственно длину этой орбиты. Для сохранения симметрии и ахроматичности системы необходимо во второй

половине системы при помощи магнита  $d'$  скомпенсировать созданное возмущение. Компенсация будет иметь место, если  $d$  и  $d'$  размещены симметрично и таким образом, чтобы косинусообразная главная траектория  $C_\infty^*$  [4] горизонтального движения пересекала ось системы в середине этих магнитов.

Во втором режиме расширение пределов регулирования энергии также осуществляется воздействием на ВЧ-напряжение резонатора  $T_1$ . Однако в этом случае при регулировании энергии ось пучка смещается от оси системы на величину  $X_{\Delta p_0}$  (кривая 2 рис. 5), существенно меньшую, чем в первом режиме.

Необходима стабилизация поля в магнитах  $m_1, m'_1, m_2$  с точностью  $10^{-5}$ , в  $M_1$  и  $M'_1$  — с точностью  $2 \cdot 10^{-5}$  и токов в квадрупольных линзах с точностью  $10^{-4}$ .

**Аберрации продольного движения.** Определяемый из кривых рис. 1 коэффициент улучшения энергетического разброса тем больше, чем меньше фазовая ширина  $2\Delta\phi_0$  моноэнергетических сгустков у входа в дебанчер. Однако на пути от дефлектора циклотрона до дебанчера моноэнергетические сгустки удлиняются. Эффект первого порядка удлинения моноэнергетических сгустков в магнитном поле рассеяния циклотрона может быть скомпенсирован соответствующим формированием пучка в 45-градусном поворотном магните, расположенном между циклотроном и системой монохроматизации. Остаются оптические эффекты

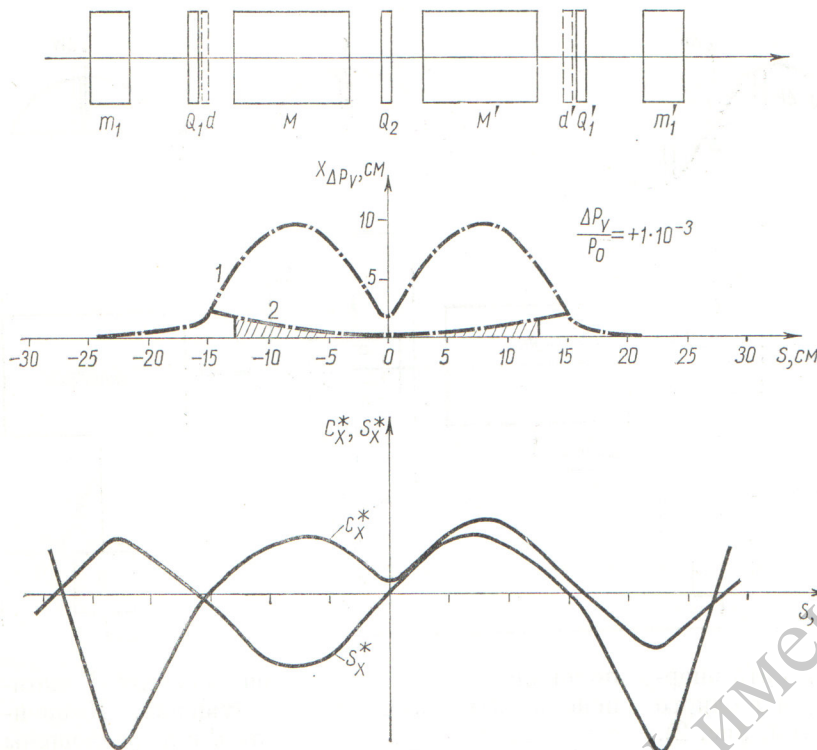


Рис. 5. Смещение  $X_{\Delta P_V}$  оси пучка при регулировании энергии и косину-сообразные  $C_x^*$  и синусообразные  $S_x^*$  главные траектории.

Заштрихованная площадь под кривой 2 соответствует отрицательному сдвигу фазы, компенсирующему положительный сдвиг на пути от  $T_1$  до  $T_2$  во втором режиме регулирования энергии.

более высоких порядков малости и влияние на продольное движение собственного поля пучка, но последним эффектом можно пренебречь из-за малой плотности объемного заряда.

Изменение длины траекторий частиц по сравнению с  $L_0$  во втором приближении определяется формулой

$$\Delta l = \int_0^{L_0} \left[ \frac{1}{\rho} (\Delta x_x + \Delta x_z) + \frac{1}{2} (x'^2 + z'^2) \right] ds, \quad (3)$$

где  $x'(s)$ ,  $z'(s)$  — угловые отклонения линейного приближения;  $\Delta x_x(s)$  — горизонтальные aberrации второго порядка в медианной плоскости системы;  $\Delta x_z(s)$  — горизонтальные aberrации, учитывающие влияние вертикального движения.

Частичная компенсация aberrационного удлинения может быть осуществлена подбором параметров двух пар симметрично размещенных секстипольных магнитов  $SP_2$ ,  $SP_2'$  и  $SP_3$ ,  $SP_3'$  (см. рис. 2).

Анализ свойств системы монохроматизации пучка подтверждает возможность уменьшения энергетического разброса циклотронного пучка

с  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-4}$  при фазовой ширине сгустков в циклотроне около  $5^\circ$ , если будет осуществлена тщательная наладка магнито-оптической части системы, включая коррекцию aberrационных эффектов.

Авторы благодарны А. В. Антонову, В. А. Глухих, О. А. Гусеву, Р. Н. Литуновскому, А. А. Оглоблину, И. И. Финкельштейну за обсуждение различных аспектов проблемы и А. Ф. Сергееву — за помощь в организации расчетов на ЭВМ.

Поступила в Редакцию 16/IX 1969 г.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Г. Басаргин, Р. Н. Литуновский. «Докл. АН СССР», 186, № 6, 1288 (1969).
2. Ю. Г. Басаргин. ЖТФ, 39, № 12, 2247 (1969).
3. Французский патент № 1.205.220. 1960 г.
4. К. Штеффен. Оптика пучков высокой энергии. М., «Мир», 1969.
5. Ю. Г. Басаргин. ЖТФ, 39, № 2, 241 (1969).
6. А. Alekseev et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-13, No. 4, 515 (1966).
7. Ю. Г. Басаргин и др. ЖТФ, 39, № 8, 1472 (1969).