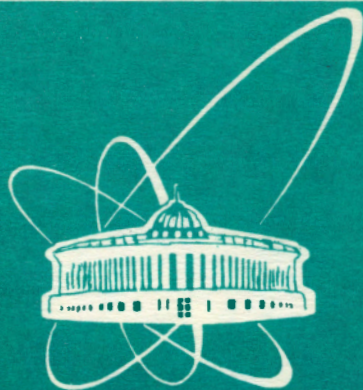


93-402



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P9-93-402

Ю.Г.Аленицкий, Н.А.Морозов, А.Ф.Чеснов

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТА
ДЛЯ ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-120К

1993

Изохронный циклотрон У-120К предназначен для ускорения протонов (11—40 МэВ), дейтронов (6—17 МэВ), α -частиц (11—35 МэВ) и гелия-3 (15—45 МэВ) с интенсивностью выведенного пучка до 100 мкА. Проект ускорителя является модификацией изохронного циклотрона У-120М [1], магнитная система которого создана на базе Ш-образного электромагнита (диаметр полюса равен 120 см). Для максимальной энергии протонов электромагнит работает в форсированном режиме при уровне индукции в некоторых областях магнитопровода ≥ 2 Тл и плотности тока в обмотке возбуждения $2,3 \text{ А/мм}^2$. Эти обстоятельства приводят к большой величине потребляемой мощности магнитной системы ускорителя, равной $\approx 130 \text{ кВт}$. Поэтому при разработке проекта циклотрона У-120К была проведена оптимизация магнитопровода и обмотки возбуждения электромагнита с целью снижения потребляемой мощности при сохранении конструкторских разработок остальных систем ускорителя У-120М.

С использованием программы POISCR [2] проведены расчеты по определению влияния изменений геометрии магнита со спиральной системой шимм циклотрона У-120М на магнитное поле в зоне рабочих и выводных радиусов, а также влияния на уровень возбуждения основной обмотки магнита.

Расчетная геометрия представлена на рис.1,2. В области горизонтальной балки и вертикальной стойки магнита отличие коэффициента заполнения магнитным материалом по углу 2π от 360° учитывалось в расчетах

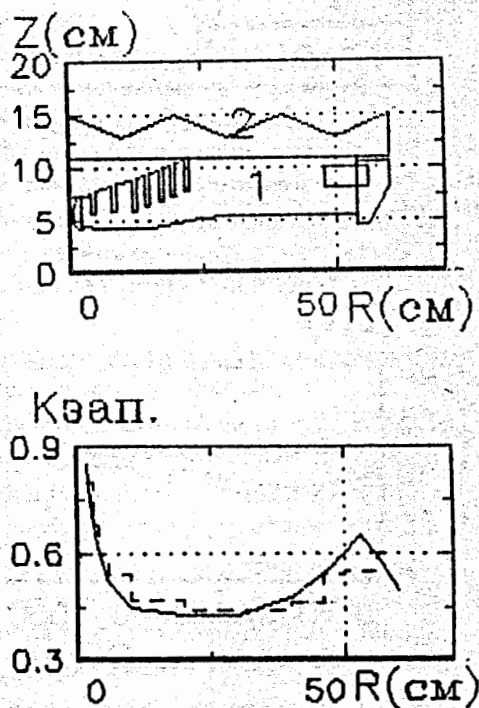


Рис.1. Расчетная геометрия для области спиральных шимм У-120М

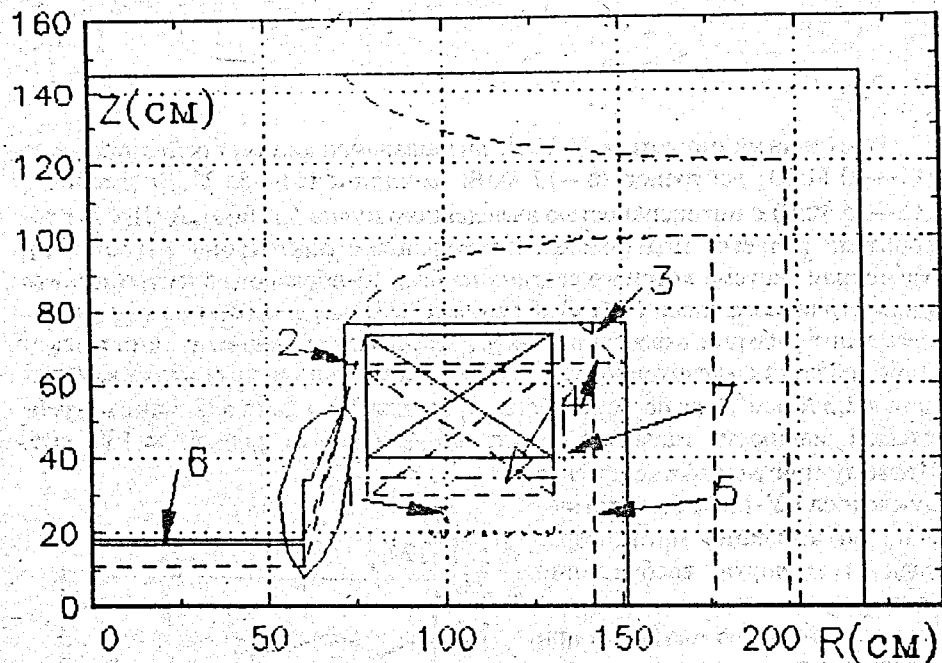


Рис.2. Расчетная геометрия У-120М с магнитом СП-44В (область спиральных шимм не изображена).

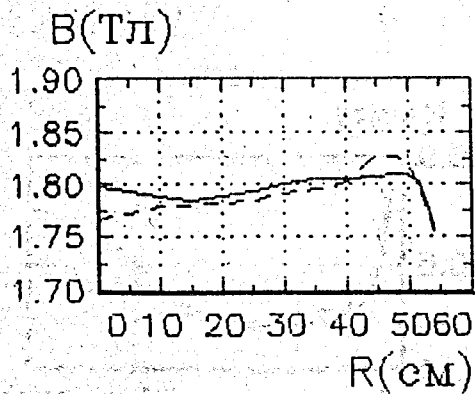


Рис.3. Магнитное поле для $I_0 = 600$ А: — эксперимент, --- расчет

изменением их геометрии (штриховая линия на рис.2). В области спиральных шимм использовалось разбиение на зоны с различными коэффициентами заполнения ($K_{\text{зап}}$). Использованные значения $K_{\text{зап}}$ приведены на рис.1. Результаты расчета среднего магнитного поля для двух уровней индукции представлены на рис.3,4 в сравнении с экспериментальными кривыми.

Применяемая расчетная схема хорошо ($\Delta B/B < 2\%$) описывает магнитное состояние системы в условиях высокого

насыщения ($B_{\text{ср}} \sim 1,8$ Тл). При низком уровне поля существенное значение имеет азимутальная форма спиральных шимм, которая не учитывается в данных расчетах. Отклонение расчетного поля от экспериментального составляет $\sim 8\%$ в центре и $\sim 6\%$ в зоне конечных радиусов. Так как в данной работе рассматривается электромагнит при высоком уровне поля, то можно считать, что принятая расчетная схема удовлетворительна и полученные результаты имеют отклонение $\Delta B/B < 2\%$.

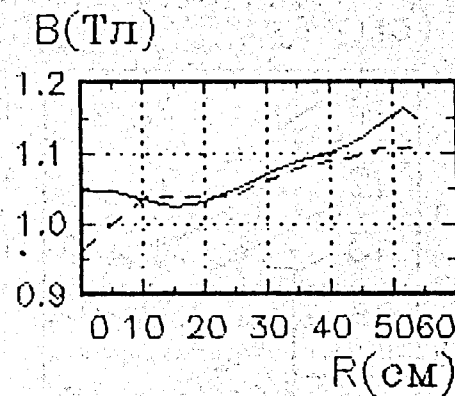


Рис.4. Магнитное поле для $I_0 = 175$ А: — эксперимент, --- расчет

1. Расчет изменений формы полюса

а) Изменения полюса, совместимые с конструкцией циклотрона У-120М. Просчитаны варианты формы полюса, отмеченные на рис.5 (а1— а4): «и» — исходная форма полюса, заложенная в конструкцию У-120М, а1 — форма полюса, которая первоначально предполагалась для циклотрона У-120К. Изменение формы полюса приводит к трем эффектам:

- увеличивается уровень магнитного поля в зоне рабочих радиусов, что дает возможность снизить ток возбуждения основной обмотки магнита и, следовательно, снизить мощность, рассеиваемую в ней для получения той же энергии ускоряемых частиц;

- изменяется форма поля в зоне рабочих радиусов, что приводит к изменению нагрузки на корректирующие обмотки ускорителя;

- изменяется распределение магнитного поля в области вывода пучка, что приводит к изменению режима работы элементов системы вывода.

На рис.6 показаны зависимости мощности, рассеиваемой в основной обмотке магнита (P_0) и в концентрических обмотках ($P_{\text{кон}}$), от формы полюса для максимальной энергии протонов 40 МэВ. ΔB — величина возмущения магнитного поля в зоне выводных траекторий. На рис.7 представлены распределения возмущения магнитного поля в зоне выводных траекторий для различных форм полюса, где $\Delta B = B_{ai}(r) - B_{ii}(r)$, $i = 1, 2, 3, 4$. Из этих кривых видно, что оптимальной является форма полюса а4, так как при одинаковом снижении мощности питания основной обмотки магнита (примерно на 20%) она даст минимальное возмущение в зоне выводных траекторий

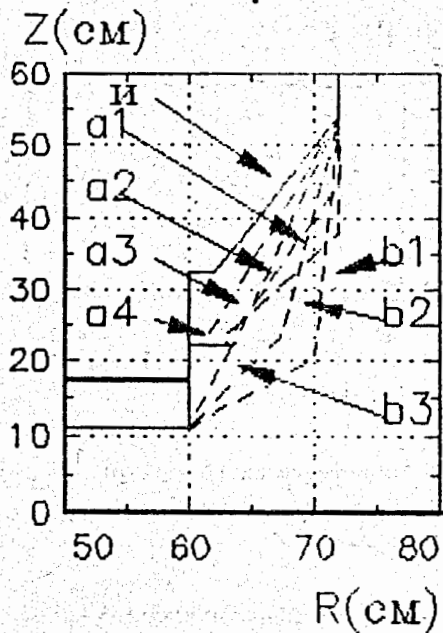


Рис.5. Изменение формы полюса магнита

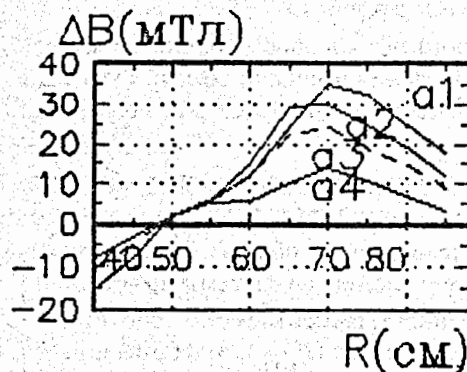


Рис.7. Изменение магнитного поля в зоне вывода при изменении формы полюса для уровня поля $I_0 = 600$ А

требующие доработки конструкции вакуумной камеры ускорителя. При новой разработке конструкции ускорителя типа У-120М возможно пойти на более глубокие изменения формы полюса магнита, затрагивающие и по-

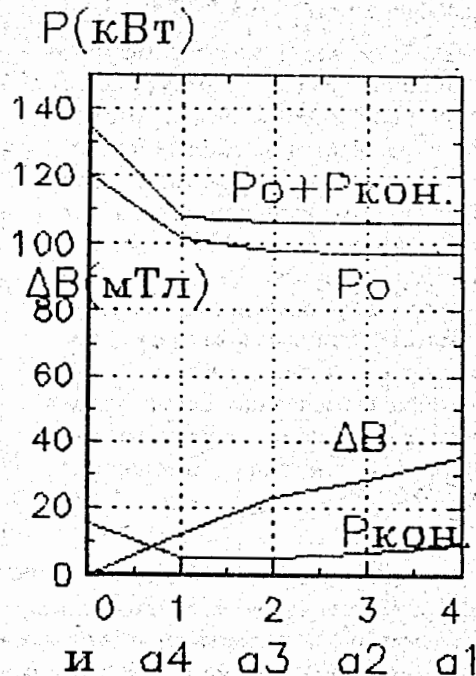


Рис.6. Изменение мощности питания обмоток и максимальное возмущение магнитного поля в зоне вывода для $I_0 = 600$ А: a_1, a_2, a_3, a_4 — номер варианта формы полюса (см.рис.5)

($\Delta B_{\max} = 15$ мТл). Для компенсации этого возмущения при помощи элементов системы вывода требуется увеличение снижения магнитного поля во второй секции до 30 мТл, что обеспечивается выбранными параметрами секций комбинированного дефлектора У-120К [3].

б) Изменения формы полюса,

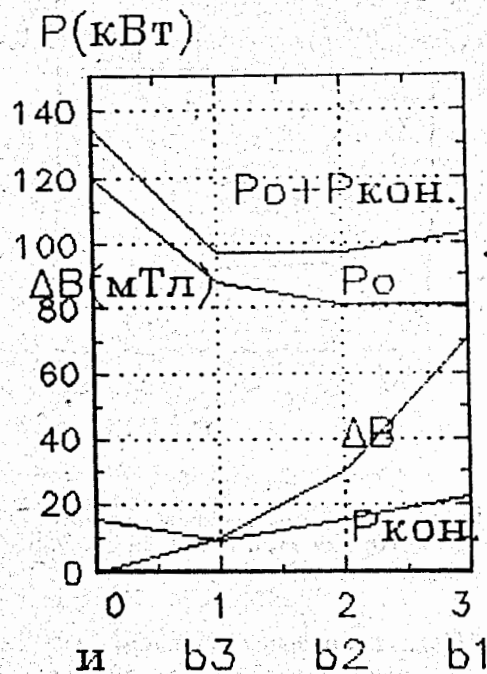


Рис.8. Изменение мощности питания обмоток и максимальное возмущение магнитного поля в зоне вывода для $I_0 = 600$ А: b_1, b_2, b_3 — номер варианта формы полюса (рис.5)

люсный ферромагнитный диск, образующий крышку вакуумной камеры. Просчитанные изменения формы полюса отмечены на рис.5 (b_1-b_3). Характеристики изменения мощности питания обмоток и магнитного поля представлены на рис.8,9. Обозначения те же, что и на рис.6,7. Кроме того, на рис.9 представлены расчеты для минимальной энергии ускоренных протонов ($E_p = 13$ МэВ). В зоне рабочих радиусов для этого уровня индукции изменение формы полюса не вносит изменений в магнитное поле ускорителя. Для данного варианта изменений формы полюса оптимальной является форма b_3 . Для нее снижение мощности питания обмоток составляет 27%, максимальное возмущение поля в зоне выводных траекторий ≈ 10 мТл, что компенсируется увеличением снижения поля в секциях комбинированного дефлектора.

Причина значительной экономии электроэнергии при изменении формы полюса видна из рис.10,11, где представлены распределения магнитной индукции поля (B) и магнитной проницаемости (μ) в полюсе для исходной формы полюса и для варианта полюса b_3 (штриховые кривые). Видно, что для исходной формы характерно

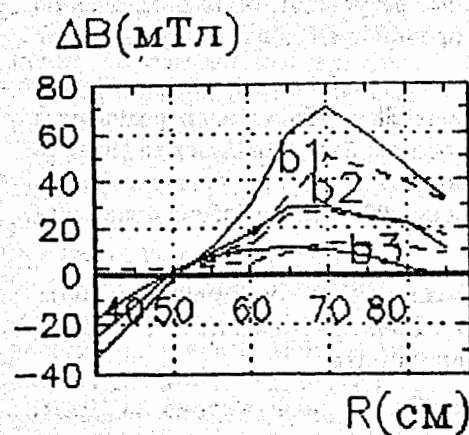


Рис.9. Изменение магнитного поля в зоне вывода при изменении формы полюса: — для $I_0 = 600$ А, --- для $I_0 = 175$ А

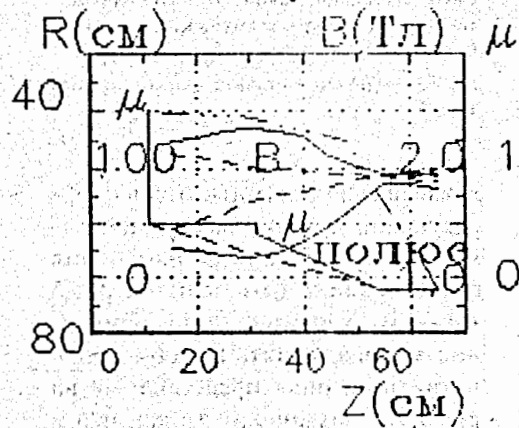


Рис.10. Зависимость индукции магнитного поля (B) и магнитной проницаемости (μ) в полюсе от z для $R = 50$ см

высокое намагничивание полюса (до 2,3 Тл), что приводит к сильному росту магнитного сопротивления ($\mu = 20$). Изменение формы полюса позволяет повысить значение μ до 80, что дает резкое падение магнитного сопротивления этой части полюса. Аналогичные результаты по распределению магнитной индукции поля и магнитной проницаемости в полюсе получены для варианта a_4 .

2. Изменение полюса вблизи горизонтальной балки электромагнита (2 на рис.2). Данное изменение формы полюса дает возможность снизить мощность питания основной обмотки магнита для максимальной энергии протонов на 10% при отсутствии возмущения поля в зоне рабочих радиусов и в зоне вывода.

3. Добавка ферромагнитного материала между горизонтальной балкой и вертикальной стойкой (3 на рис.2). Данное изменение не влияет на поле и уровень питания основной обмотки магнита.

4. Снижение высоты расположения обмотки возбуждения на 10 см, при одновременном снижении высоты горизонтальной балки магнита (4 на рис.2). Данное изменение дает возможность снизить мощность питания основной обмотки магнита на 8% без существенного влияния на магнитное поле в области рабочих и выводных радиусов. Увеличение высоты расположения обмотки и горизонтального яра на 7,5 см приводит к увеличению мощности питания обмотки на 8%.

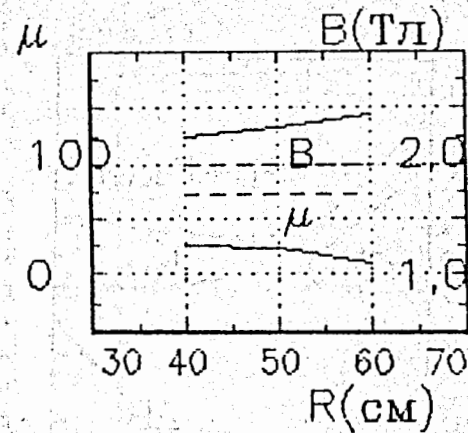


Рис.11. Зависимость индукции магнитного поля (B) и магнитной проницаемости (μ) в полюсе от R для $z = 50$ см

5. Приближение вертикальной стойки к полюсу на 10 см (5 на рис.2). Данное изменение не влияет на магнитное поле и величину мощности питания основной обмотки магнита.

6. Устранение воздушного зазора ($\Delta z = 5$ мм) между полюсом и диском вакуумной камеры (6 на рис.2). Устранение этого зазора приводит к экономии 12% мощности питания основной обмотки магнита. Изменение распределения магнитного поля в области рабочих радиусов ускорителя приведено на рис.12.

Таким образом, если конструктивно реализовать для вновь создаваемого ускорителя У-120К изменения магнитопровода электромагнита ($a_4, 2, 6$), то для максимального уровня возбуждения можно получить экономию мощности питания около 40%. В данном варианте не требуется изменения конструкции остальных систем ускорителя.

Оптимизация обмотки возбуждения магнита заключалась в увеличении площади поперечного сечения и коэффициента заполнения токовыми проводниками. Оба фактора приводят к уменьшению плотности тока, а следовательно, и рассеиваемой мощности. В таблице приведены электрические характеристики исходного варианта обмотки возбуждения (У-120М) и предлагаемого для ускорителя У-120К для энергии протонов 40 МэВ. В качестве проводника используется квадратная медная трубка со стороной 18,5 мм и отверстием для охлаждения диаметром 10 мм.

На рис.13 показано поперечное сечение обмотки возбуждения. В отличие от прототипа, она увеличена на две секции и коли-

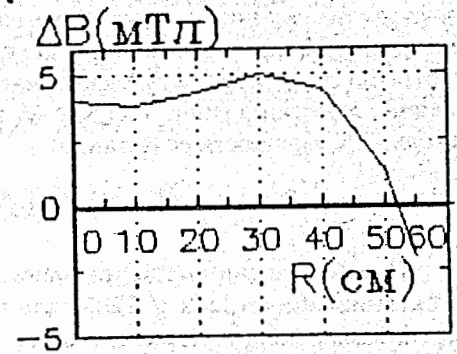


Рис.12. Изменение магнитного поля при устранении воздушного зазора 5 мм для $I_0 = 600$ А

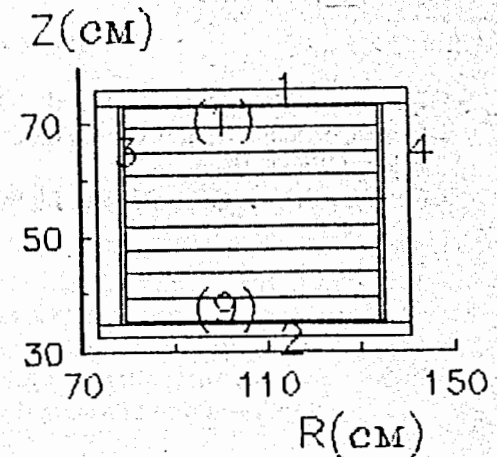


Рис.13. Схема обмотки возбуждения магнита: 1,2 — верхняя и нижняя шайбы каркаса, 3 — внутренние кольца и стойки, 4 — наружные стойки, (1) — (9) — секции обмотки

Таблица. Электрические параметры обмотки возбуждения электромагнита СП-44В

Ускоритель	I, A	$I \times W \times 10^3$	$j, A/mm^2$	U, B	$P, кВт$
У-120М	600	436,8	2,293	212	127,2
У-120К	434	436,8	1,658	215	93,3

чество витков в каждой секции изменено с 52 до 56. Данные изменения геометрии требуют минимальных конструкторских доработок и уменьшают потребляемую мощность электромагнита на 27%. Кроме того, изменение формы обмотки в данном случае (7, рис.2) приводит дополнительно к экономии 2% мощности ее питания.

Выводы

При соблюдении максимального использования конструкторской документации циклотрона У-120М для изготовления ускорителя У-120К потребляемая мощность магнитной системы может быть уменьшена на 50—60% и составит 50—60 кВт.

В заключение авторы благодарят В.П.Дмитриевского и Л.М.Онищенко за ценные советы и предложения, высказанные при обсуждении данной работы.

Литература

1. Аленицкий Ю.Г. и др — ОИЯИ, Р9-10382, Дубна, 1976.
2. Holsinger R.F., Iselin Ch. — The CERN POISSON program package user guide, CERN, 1983.
3. Борисов О.Н. и др. — ОИЯИ, Р9-90-574, Дубна, 1990.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 ноября 1993 года.

Аленицкий Ю.Г., Морозов Н.А., Чеснов А.Ф.
Оптимизация электромагнита для изохронного
циклотрона У-120К

Р9-93-402

Проект ускорителя У-120К является модификацией изохронного циклотрона У-120М (ИЯФ ЧСАН, Ржеж), магнитная система которого создана на базе Ш-образного электромагнита ($\phi_{II} = 120$ см). Приведены результаты расчета по оптимизации магнитопровода и обмотки возбуждения электромагнита, позволяющие уменьшить потребляемую мощность магнитной системы ускорителя на 50—60%. Показано, что при максимальном использовании конструкторской документации У-120М потребляемая мощность магнитной системы изохронного циклотрона У-120К составит 50—60 кВт.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1993

Перевод М.И.Потапова

Alenitskiy Yu.G., Morozov N.A., Chesnov A.F.
Optimization of Electromagnet for Isochronous
Cyclotron U-120K

Р9-93-402

The U-120K accelerator project is a modification of the isochronous cyclotron U-120M (Ins. Nucl. Res., Czecho-Slovakian Acad. Sci., Rzhesh) with the magnet system based on an Ш-shaped electromagnet ($\phi_p = 120$ cm). The paper reports the results of calculation aimed at optimization of the electromagnet core and excitation coil, which allows the power consumption of the accelerator electromagnet system to be reduced by 50—60%. With the maximum use of the U-120M design documentation, the power consumption of the U-120K cyclotron magnet system is shown to be 50—60 kW.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1993