

# Секторный циклотрон с диаметром полюсов электромагнита 685 мм

А. Г. АЛЕКСЕЕВ, В. Н. БАРКОВСКИЙ, Ю. Г. БАСАРГИН, В. Н. ВАСИЛЬЕВ,  
Р. Н. ЛИТУНОВСКИЙ, О. А. МИНЯЕВ, В. Н. НИКОЛАЕВ, А. В. СТЕПАНОВ

УДК 621.384.614

Циклотрон с диаметром полюсов магнита 685 мм является моделью большого ускорителя с переменной энергией ускоренных частиц — 2,4-метрового изохронного циклотрона, проект которого был также выполнен в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова [1]. На этом циклотроне можно будет ускорять ионы с отношением заряда к массе, равным  $1/8-1$ . Конечная энергия ионов будет регулироваться в широких пределах (например, диапазон энергий ускоренных протонов 7,5 Мэв — 100 Мэв, а дейтонов 5 Мэв — 65 Мэв). Диапазон изменения энергии в модели равен: для протонов 2—8 Мэв, дейтонов 0,5—4 Мэв и  $\alpha$ -частиц 1—8 Мэв.

Основные характеристики магнита ускорителя:

Диаметр полюса магнита . . . . .	68,5 см
Конечный радиус ускорения . . . . .	29 см
Воздушные зазоры магнита . . . . .	7 см/22 см
Число элементов периодичности магнитной структуры . . . . .	3
Максимальная напряженность магнитного поля в центре . . . . .	15 кэ
в центре «холма» . . . . .	18,5 кэ
в центре «долины» . . . . .	9 кэ
Амплитуда основной гармоники вариации поля . . . . .	$\leq 5,6$ кэ
Максимальная спиральность поля . . . . .	$\sim 20^\circ$
Мощность питания электромагнита . . . . .	100 квт
Макс. ток в концентрических витках суммарная мощность питания концентрических витков . . . . .	1500 а
Вес электромагнита . . . . .	100 квт
	12 т

Апертура ускорительной камеры равна 49 мм. В пазах крышек камеры уложено девять пар концентрических корректирующих витков с независимым питанием. Один дуант с угловой протяженностью  $180^\circ$  имеет апертуру 17 мм. Четвертьволновая резонансная линия находится при атмосферном давлении, поэтому ввод внутреннего штока линии в камеру сделан через изолятор. ВЧ-генератор мощностью 7 квт работает в непрерывном режиме; амплитуда напряжения на дуанте  $\leq 15$  кэ. Ионный источник щелевого типа с горячим катодом вводится в камеру через вакуумный шлюз. Циклотрон оснащен тремя сменными мишенями-пробниками, расположенными через  $60^\circ$ .

Монтаж, магнитные измерения и запуск циклотрона были выполнены в 1963 г. Топография магнитного поля циклотрона (включая поля корректирующих концентрических витков) исследовалась при индукции в центре, равной 13895 гс. На рис. 1 показана зависимость средней по азимуту напряженности магнитного

поля  $\bar{H}$  от радиуса при выключенных (кривая 1) и включенных (2) концентрических витках \* пунктирной линией показано теоретическое «изохронное» магнитное поле для ускорения дейтонов до 4 Мэв. Отличие скорректированного поля от «изохронного» не превышает  $\pm 6\%$ . Топография магнитного поля исследовалась на элементе периодичности через  $2,5^\circ$  по азимуту и 1 см по радиусу датчиком Холла из сурьмянистого

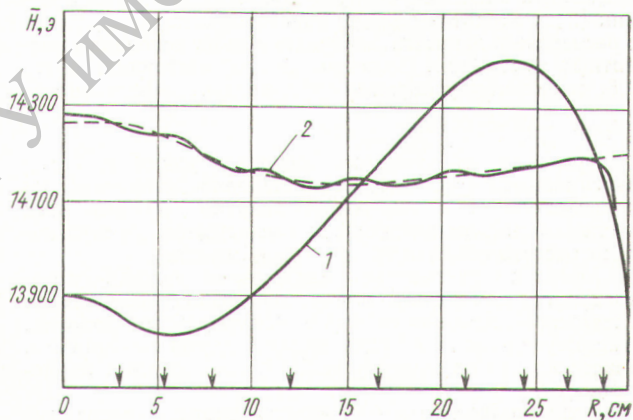


Рис. 1. Средняя по азимуту напряженность магнитного поля (стрелками указано положение концентрического витка).

индия площадью  $1 \text{ мм}^2$ . Погрешность измерений не превышала  $4 \cdot 10^{-4}$ . Низшие гармоники азимутальных возмущений поля измерялись двумя включенными встречно индукционными катушками, разнесенными на элемент периодичности. Точность измерения амплитуды первой гармоники поля составляла около 0,5 э. На рис. 2 показаны результаты измерений низших гармоник азимутальных возмущений магнитного поля.

Ускорение дейтонов с амплитудой напряжения на дуанте 5 кэ моделировало (по фазовому движению) ускорение протонов в большом циклотроне до 100 Мэв, где амплитуда ВЧ-напряжения составляет 125 кэ. На рис. 3 показана зависимость тока на мишень от ее радиуса. Характер кривых указывает на отсутствие потерь интенсивности пучка из-за сдвигов фазы ионов. Общее уменьшение интенсивности пучка при понижении амплитуды напряжения на дуанте объяс-

\* Токи в них были определены при помощи вычислительной машины «Урал-2».



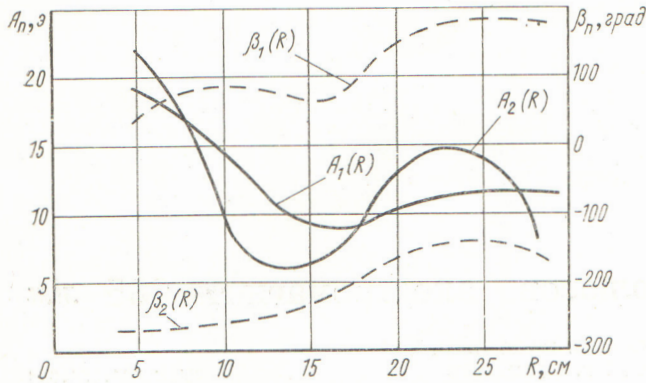


Рис. 2. Амплитуды и фазы низших гармоник азимутальных возмущений магнитного поля.

няется снижением эффективности вытягивания ионов из источника\*.

Проведено изучение фазовых сдвигов при ускорении дейтронов до конечной энергии для одного варианта токов возбуждения concentрических обмоток. Картина фазовых сдвигов, т. е. зависимость  $\sin \theta (R)$ , была получена при анализе резонансных кривых  $I(H)$  для различных значений радиуса положения мишеней-пробников [2]. Результаты эксперимента хорошо согласуются с расчетными данными, полученными на основании магнитных измерений. Величина  $\Delta \sin \theta$  составляет около 0,6, что в конце ускорения соответствует эффективности цикла  $\frac{\Delta \theta}{2\pi} \approx 0,16$ .

При помощи пробника, имевшего узкий (0,5 мм) вертикальный электрод, было найдено положение начальных орбит ионов малой энергии. Данные этих экспериментов также хорошо согласуются с результатами расчета начальных траекторий частиц.

Подробно рассмотрено влияние на амплитуду радиальных колебаний ионов некоторых параметров начальной ионно-оптической системы циклотрона. Амплитуда колебаний определялась двумя пробниками, разнесенными по азимуту на  $120^\circ$ , т. е. элемент периодичности.

При использовании целевого ионного источника (ширина щели 4 мм) без вытягивающего электрода на дуанте амплитуда радиальных колебаний ионов вблизи конечного радиуса составляла 10 мм. После уменьшения щели до 1 мм и установки вытягивающего электрода (на расстоянии 3 мм от источника) амплитуда колебаний была снижена до 3–4 мм.

На величину амплитуды радиальных колебаний большое влияние оказывает правильный выбор положения ионного источника относительно ускоряющей щели. При смещении ионного источника на 2–3 мм от оптимального положения появляется «убегающий» пучок высокой энергии, что связано с воздействием на частицы нелинейного резонанса  $\nu_r = 3/3$ . Если расположить источник в центре камеры, то ионный пучок полностью исчезнет, не достигнув энергии 0,5 Мэв. Направление дрейфа ионов малой энергии  $\theta = 60 \div 240^\circ$ . Наблюдаемое в конце ускорения некоторое увеличение амплитуды объясняется, по-видимому,

\* При снятии зависимостей, приведенных на рис. 3, из соображений радиационной безопасности ток пучка ограничивался величиной 20 мкА. Однако на конечном радиусе могли быть получены токи  $\sim 50$  мкА.

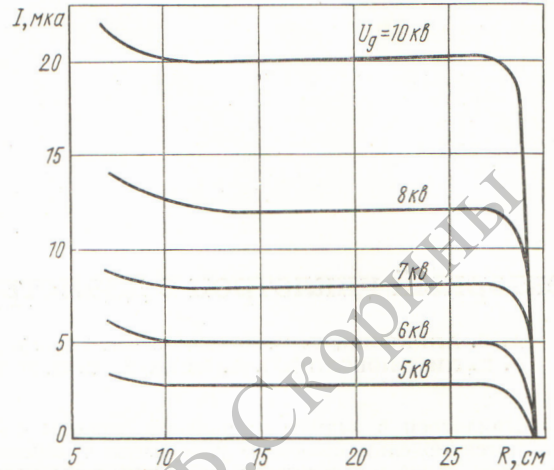


Рис. 3. Зависимость интенсивности ионного тока от радиуса установки пробника при различных значениях амплитуды ускоряющего напряжения.

также воздействием резонансов в краевой области магнитного поля, где  $\nu_r \approx 1$ .

Коллимированием пучка ионов на его первых оборотах можно было уменьшить амплитуду колебаний до 1–2 мм. При этом на протяжении 30 оборотов наблюдается отчетливое разделение орбит.

Без коллиматора орбиты «сливаются» уже через несколько оборотов. Слияние отдельных орбит вызвано, очевидно, временной нестабильностью уровня магнитного поля, амплитуды и частоты ускоряющего напряжения, а также различием в природе энергии за один оборот для частиц с разными стартовыми фазами. Улучшение начального разделения при установке коллиматора получено путем отсеки части ионов, имеющих фазы (расчетные) вне полосы  $-30 \div +15^\circ$ . Однако временные пульсации магнитного поля, амплитуды и частоты ускоряющего напряжения вызывают «перемешивание» орбит на средних и больших радиусах.

Структура магнитного поля обеспечивает аксиальную фокусировку ионов во всей области ускорения. Измеренные частоты бетатронных колебаний хорошо согласуются с расчетными [3].

При ускорении ионов молекулярного водорода  $H_2^+$  была отмечена существенная роль процесса их диссоциации на протоны. В условиях, существующих в секторном циклотроне, где ионы совершают несколько сот оборотов, этот процесс может помешать получению интенсивного пучка ионов  $H_2^+$  конечной энергии, если вакуум в ускоряющей камере ниже  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.

Эксперименты проводились с внутренним пучком ионов. Сейчас заканчиваются подготовительные работы по выводу пучка ионов. Он будет осуществлен при помощи электростатического deflectора общей длиной  $60^\circ$  и максимальным потенциалом 30 кВ.

Поступило в Редакцию 4/IX 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Алексеев и др. В кн. «Труды Международной конференции по ускорителям (Дубна, 1963)». М., Атомиздат, 1964, стр. 600.
2. A. Gagnon, Smith Lloyd, CERN 63—19, 18, 1963.
3. Ю. Г. Басаргин, В. П. Белов. Электрофизическая аппаратура. Сборник статей. Вып. 3. М., Атомиздат, 1965, стр. 3.