

УДК 621.584.633.5

Основные параметры 150-сантиметрового изохронного циклотрона Института атомной энергии им. И. В. Курчатова

БУЗУЛУКОВ Ю. П., ВЕНИКОВ Н. И., КОНДРАТЬЕВ Л. Г., ЛАТУШКИН С. Т., РЕЗВОВ В. А., УНЕЖЕВ В. Н., ХОДАКОВ Е. М., ЧУМАКОВ Н. И., ЮДИН Л. И., ЮПИНОВ Ю. Л.

Для увеличения конечной энергии и типов ускоряемых ионов с возможностью регулирования их в широком диапазоне и улучшения параметров пучков ионов циклотрон ИАЭ [1] реконструирован в изохронный. Этому предшествовало моделирование магнитной структуры [2] с тщательным расчетом динамики пучка, в результате чего была выбрана магнитная структура, схематически представленная на рис. 1, со следующими основными параметрами:

Диаметр полюсов, см	150
Число пар секторов	3
Максимальная спиральность, град	55
Зазор между секторами, см	20
Зазор между долинами, см	34
Число пар концентрических обмоток	8
Число пар гармонических обмоток	9
Число пар медианных обмоток	4
Максимальный ток обмоток, А	1000
Давление охлаждающей воды, кгс/см ²	12
Средняя индукция на конечном радиусе, кГс	7—18

Все корректирующие обмотки питаются от стабилизированных тиристорных преобразователей с точностью стабилизации 10⁻⁴.

Выбранная форма секторов с широкими фасками дает слабые эффекты насыщения в диапазоне 7—18 кГс, что иллюстрируется рис. 2 и 3, где приведены флаттер $F = [\bar{B}^2 - (\bar{B})^2]/(\bar{B})^2$ и тангенс угла спиральности $\text{tg } \gamma$ для крайних уровней поля.

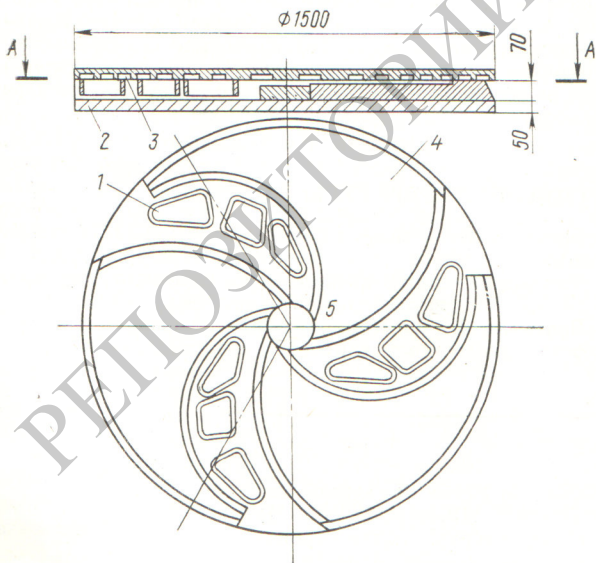


Рис. 1. Схема магнитной структуры:

1 — гармонические обмотки; 2 — основной диск; 3 — система концентрических обмоток; 4 — сектор; 5 — центральный диск

Фокусировка пучка в центральной области циклотрона полностью обеспечивается электрическим полем между щелевыми диафрагмами [3], расположенными на дуантах до радиуса 20 см и определяющими также форму начальных орбит.

Особое внимание было уделено обеспечению высокой степени изохронности магнитного поля. Для этого была разработана [4] система бесконтактной диагностики временных характеристик микросгустков ионов (фазы и формы), включающая в себя 9 емкостных сигнальных электродов, расположенных на разных радиусах (от 24 до 64 см) внутри одного из дуантов. На рис. 4 приведена типичная фотография формы и фазы микросгустков одного из режимов ускорения, иллюстрирующая строгую (<1 нс) изохронность ускорения на всех радиусах, и только в очень малой области вблизи

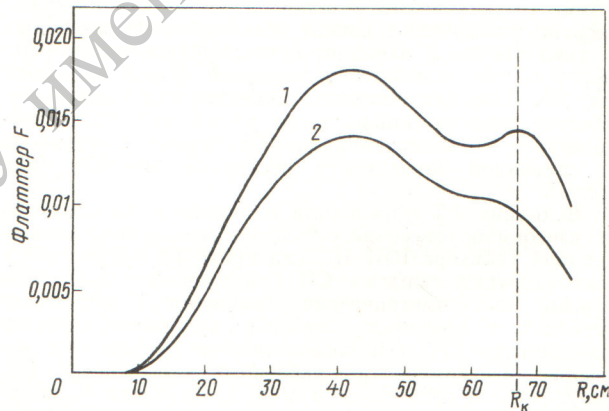


Рис. 2. Зависимость флаттера от радиуса для крайних уровней магнитного поля при $B = 7$ (1) и 18 кГс (2)

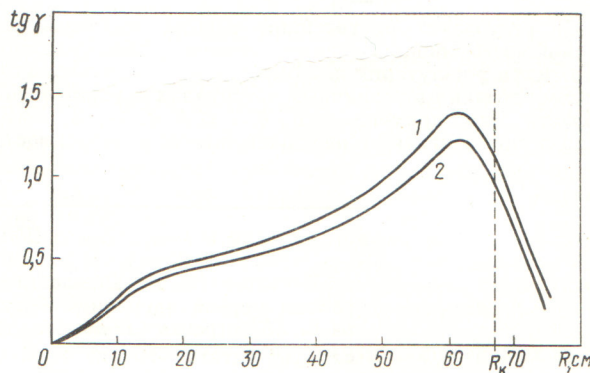


Рис. 3. Зависимость спиральности от радиуса для крайних уровней магнитного поля при $B = 7$ (1) и 18 кГс (2)

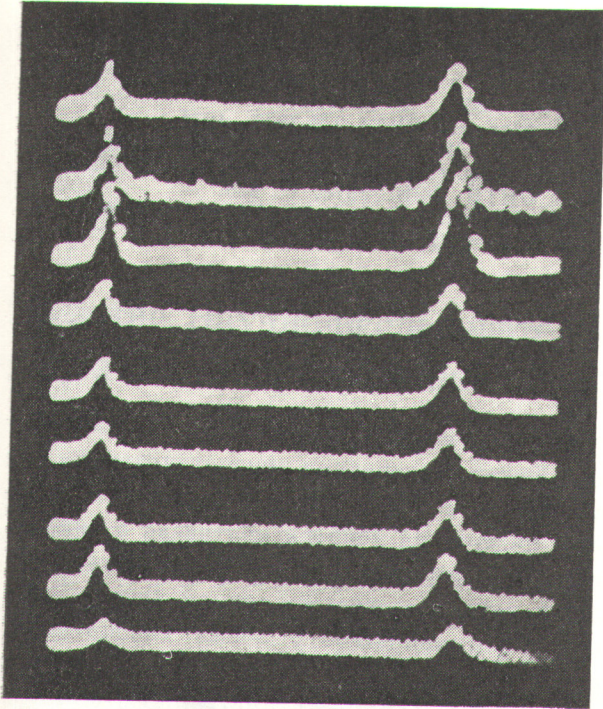


Рис. 4. Форма и положение микросгустков пучка на различных радиусах ускорения 21, 31, 40, 53, 56, 59, 62, 64 см (сверху вниз), измерение с помощью системы пикап-электродов. Для калибровки временной шкалы приведены сгустки из двух периодов ВЧ, т. е. расстояние между сгустками 74 нс

выпускного радиуса есть небольшое отклонение от изохронности (сигнал с последнего пикап-электрода), поскольку выпуск осуществляется уже в области слабопадающего магнитного поля.

Диапазон частот генератора расширен до 6–20 МГц для резонансного контура циклотрона. Это достигается увеличением диаметра дуантных штоков в месте крепления дуантов, причем диапазон 8,4–20 МГц перекрывается дуантами с малой емкостью, а 6,5–8,4 МГц — более толстыми дуантами. Максимальная амплитуда ВЧ-напряжения каждого из двух 180-градусных дуантов относительно земли достигает 80 кВ и стабилизирована с точностью 0,5%.

Пучок выпускается с радиуса 66,2 см с помощью электростатического дефлектора, состоящего из плоского (60°) и гиперболического (30°) участков с максимальным потенциалом 70 кВ и апертурой на входе 7 мм. Для коррекции угла входа в ионопровод [5] используют два нацеливающих электромагнита. Система выпуска позволяет получить для неколлимированного пучка эффективность выпуска 60%; в случае постановки в центральной области одной коллимирующей щели радиальной протяженностью 1 мм эффективность выпуска могла быть приближена к 100%, естественно, с существенным уменьшением интенсивности.

Диапазон регулирования энергии и типов ионов приведен на рис. 5, где кружками отмечены уже опробованные режимы ускорения и выпуска пучка.

Использование модифицированного источника ионов, разработанного ранее для получения многозарядных

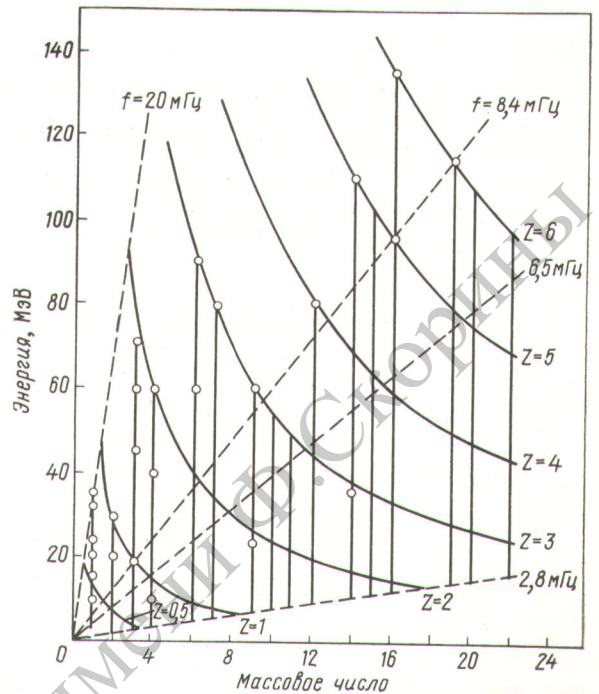


Рис. 5. Энергия ионов в циклотроне ИАЭ:

область между прямыми $f = 20-8,4$ МГц — тонкие дуанты; $f = 8,4-6,5$ МГц — толстые дуанты; $f = 6,5-2,8$ МГц — работа на III субгармонике ВЧ-напряжения. Гиперболы — ограничения по максимальной индукции при указанных зарядах ионов

ионов лития [6] и бериллия [7], с мощной импульсной системой электропитания и минимумом потерь ионов при ускорении и выпуске позволило получать пучки многозарядных ионов большой интенсивности.

Ниже приведены значения среднего тока (мкА) внешнего пучка для многозарядных ионов:

${}^6\text{Li}^{3+}$	2	${}^{12}\text{C}^{4+}$	30
${}^7\text{Li}^{3+}$	2	${}^{14}\text{N}^{5+}$	13
${}^9\text{Be}^{3+}$	2	${}^{16}\text{O}^{6+}$	1

Эти результаты получены в импульсном режиме работы циклотрона при скважности 5–15, т. е. ток ионов в импульсе превышает средний в 5–15 раз. Достигнутые интенсивности многозарядных ионов значительно превышают результаты, полученные на лучших зарубежных циклотронах [8, 9].

Широкий диапазон энергий ионов всех стабильных изотопов от водорода до неона, включая малые энергии при ускорении на третьей субгармонике дуантного ВЧ-напряжения, высокие интенсивности внешнего пучка многозарядных ионов, особенно таких, как ионы лития и бериллия, пригодность циклотрона для спектроскопии быстрых нейтронов методом времени пролета [10, 11], значительно расширяет возможности циклотрона ИАЭ для проведения физических экспериментов.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность всем сотрудникам, принимавшим участие и помогавшим в создании изохронного циклотрона.

Поступило в Редакцию 18/VII 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов А. В. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1964, № 6, с. 28.
2. Buzulukov, Yu. e.a. In: Proc. VII Intern. Conf. on Cyclotrons. Zürich, 1975, p. 205.
3. Веников Н. И., Чумаков Н. И. «Атомная энергия», 1961, т. 11, вып. 3, с. 427.
4. Дворников В. Д., Резвов В. А., Юдин Л. И. «Приборы и техника эксперимента», 1973, № 2, с. 41.
5. Веников Н. И. и др. Там же, 1975, № 1, с. 23.
6. Васильев П. И. и др. Там же, 1969, № 6, с. 16.
7. Веников Н. И., Унежев В. Н., Чумаков Н. И. [2], № 3, с. 24.
8. Clark D. e. a. In: Proc. AIP Conf. on Cyclotrons, 1972, p. 265.
9. Livingston R. ORNL-TM-3332, 1971.
10. Веников Н. И., Оглоблин А. А., Юдин Л. И. В сб.: Труды конф. «Нейтронная физика». Ч. 4. Обнинск, изд. ОНТИ ФЭИ, 1974, с. 233.
11. Бреславцев И. Д. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1972, № 4, с. 26.



Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники