

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПУЧКА В ЦИКЛОТРОНЕ С РЕГУЛИРОВАНИЕМ ИЗОХРОННОСТИ ДЛЯ НЕСКОЛЬКИХ ТИПОВ ИОНОВ С ПОМОЩЬЮ ПОВОРОТНЫХ ШИММОВ

Ю. К. Осина^{a,1}, А. В. Галчук^a, И. В. Горбунов^a

^a АО «НИИЭФА им. Д. В. Ефремова», Санкт-Петербург, 196641, Россия

С целью повышения тока пучка была проведена модернизация циклотрона СС-30/15, предназначенного для ускорения отрицательных ионов водорода до энергии 30 МэВ и отрицательных ионов дейтерия до 15 МэВ. Это привело к увеличению диаметра канала в полюсах циклотрона и изменению элементов центральной области магнита. Для корректировки основного магнита циклотрона для этих условий был проведен комплекс 3D-расчетов для обеспечения устойчивого и изохронного ускорения ионов до конечной энергии. Особое внимание было уделено обеспечению устойчивости при наличии второй гармоники магнитного поля от поворотных шиммов в режимах ускорения ионов водорода и дейтерия.

In order to increase the beam current, the СС-30/15 cyclotron designed to accelerate negative hydrogen ions to an energy of 30 MeV and negative deuterium ions to 15 MeV was upgraded. This resulted in an increase in the channel diameter in the cyclotron poles and a change in the elements of the central region of the magnet. To adjust the main cyclotron magnet for these conditions, a set of 3D calculations was performed to ensure stable and isochronous ion acceleration to the final energy. Particular attention was paid to ensuring stability in the presence of the 2nd harmonic of the magnetic field from the rotary shims in the hydrogen and deuterium ion acceleration modes.

PACS: 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Циклотрон СС-30/15 предназначен для ускорения отрицательных ионов водорода и дейтерия до энергий (15–30)/(8–15) МэВ и позволяет набирать широкий спектр радионуклидов для медицинской диагностики.

Первый образец циклотрона СС-30/15, прототипом которого явился циклотрон МСС-30/15, поставленный в университет Ювяскюля (Финляндия) в 2010 г. [1], установленный в Институте ядерных технологий Королевства Таиланд [2], предполагает получение внешнего пучка протонов 200 мкА. Для нового образца циклотрона СС-30/15 было решено увеличить ток протонов до 400 мкА. Это привело к необходимости пересмотра центральной области электромагнита при сохранении диаметра полюса.

¹E-mail: osina@luts.niiefa.spb.su

В циклотроне ускоряются два типа частиц. Для изменения конфигурации магнитного поля при переходе с одного режима циклотрона на другой электромагнит снабжен четырьмя поворотными шиммами (четыре стальных половинки усеченного конуса), расположенными в долинах — по два на каждом полюсном наконечнике.

Это простой и удобный способ перестройки режима работы циклотрона, но требует обращения особого внимания на влияние второй гармоники магнитного поля на динамику пучка. Амплитуда второй гармоники магнитного поля, создаваемой магнитными шиммами, достигает ≈ 350 Гс для двух режимов в области вывода пучка.

ЭЛЕКТРОМАГНИТ

Электромагнит — броневого типа с вертикальным расположением медианной плоскости. 3D-модель половины электромагнита приведена на рис. 1. Основные параметры электромагнита представлены в таблице.

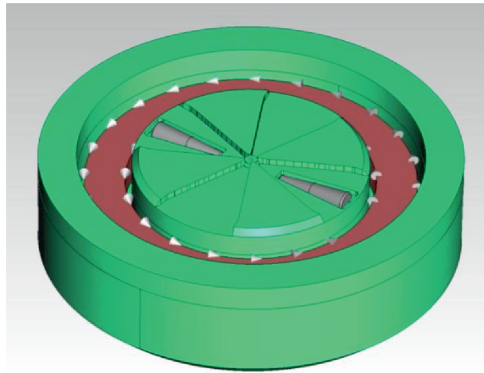


Рис. 1. 3D-модель 1/2 электромагнита циклотрона

Параметры электромагнита циклотрона СС-30/15

Параметр	Значение
Диаметр магнита, мм	2500
Ширина магнита, мм	1350
Диаметр полюса, мм	1400
Количество секторов на полюсе	4
Внешний диаметр секторов, мм	1400
Угловая протяженность секторов, °	46,2
Средний радиус выпуска пучка, мм	580
Зазор сектор/долина, мм	40/120
Индукция в центре, Тл	1,334
Индукция в холме, Тл, не более	2,0
Максимальная мощность питания, кВт, не более	12,7
Масса магнита (Fe/Cu), т	40/3

НАЧАЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ ПУЧКА

Начальные расчеты были выполнены с новой моделью электромагнита, в которую были установлены шиммы по модели тайландского образца циклотрона [2]. Новая модель магнита предусматривала решение вопросов центральной области путем увеличения зазора между секторами до 44 мм. В этом случае были проблемы со стабильностью в конечной зоне ускорения.

На рис. 2 приведено радиальное распределение среднего поля циклотрона для ускорения ионов H^- и движение рабочей точки в процессе ускорения в исходном магнитном поле циклотрона.

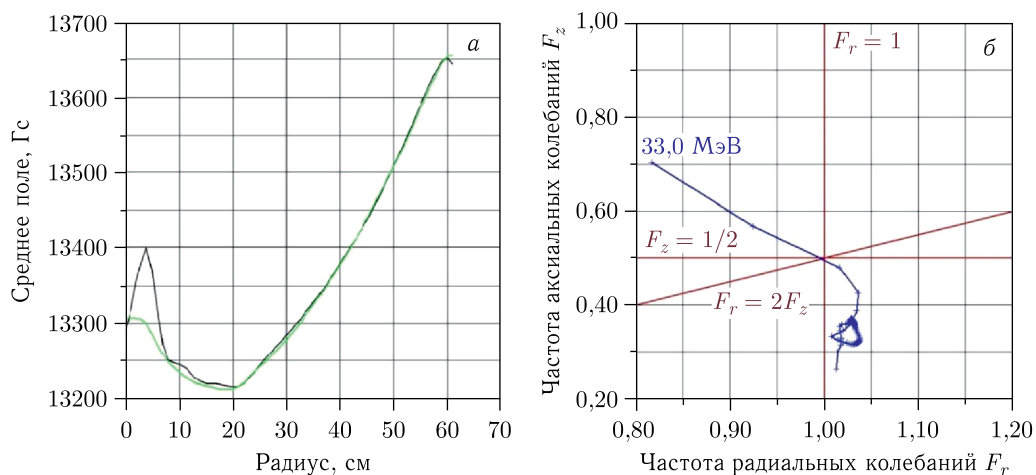


Рис. 2. Радиальное распределение среднего поля циклотрона для ускорения ионов H^- . Здесь же показано расчетное изохронное поле (а). Движение рабочей точки в процессе ускорения ионов H^- . Шаг по энергии — 0,5 МэВ (б)

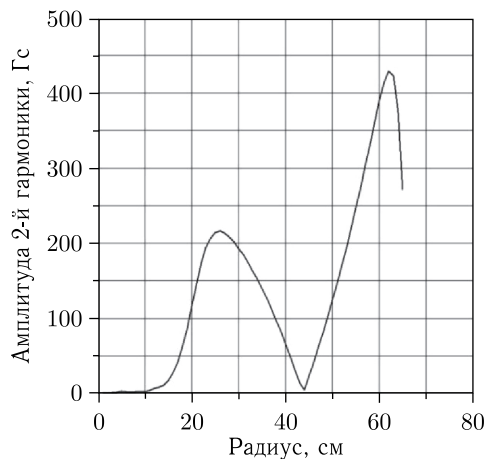


Рис. 3. Амплитуда второй гармоники для исходного магнитного поля в режиме ускорения ионов H^- . Выдвинутый шимм обеспечивает необходимое нарастание по радиусу изохронного поля

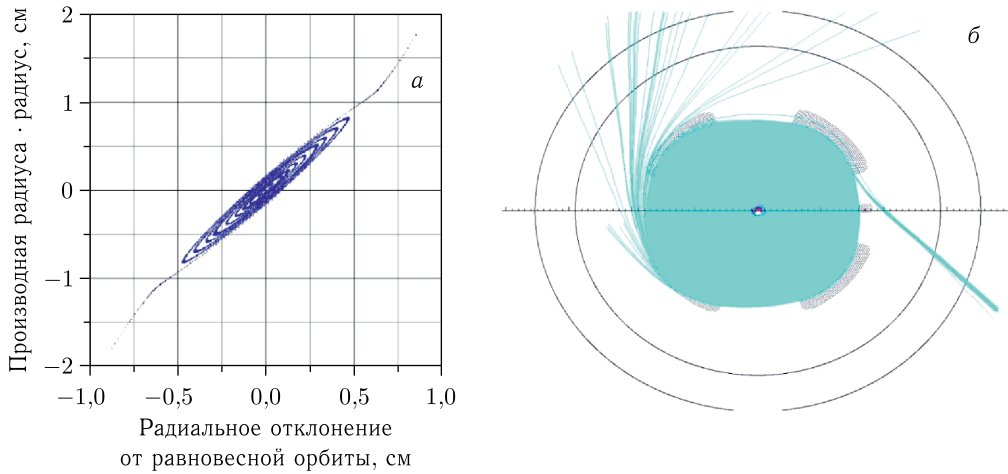


Рис. 4. Разрыв замкнутых кривых на диаграмме устойчивости в исходном магнитном поле для конечной энергии протонов 30 МэВ (а). Скриншот программы по ускорению и выпуску пучка обдиркой на фольге в исходном магнитном поле. Потери составляют примерно 25 %. Средняя энергия протонов в канале выпущенного пучка 29,9 МэВ (б)

Для уменьшения второй гармоники в области конечного радиуса ускорения поворотный шимм был утоплен относительно долин электромагнита на 3 мм. Таким образом, была уменьшена амплитуда второй гармоники в протонном режиме при сохранении необходимой разности в средних полях при перестройке с протонного режима на дейтронный. Радиальное распределение амплитуды второй гармоники дано на рис. 3.

Результаты расчетов динамики пучка в процессе ускорения и выпуска в исходном магнитном поле приведены на рис. 4. Показана диаграмма устойчивости в окрестности равновесной орбиты. Отклонение от нее приводит к росту амплитуды колебаний. При ускорении частицы, получившие большие амплитуды, выбрасываются из магнитного поля.

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЛЬНОГО ЦЕЛОГО РЕЗОНАНСА

Прохождение резонанса $2F_r = 2$ подробно исследовано для циклотрона TR30, предназначенного для ускорения ионов H^- до конечной энергии 30 МэВ [3]. Там же приводится аналитическая оценка влияния несовершенств магнитного поля в виде второй гармоники и ее производной на рост эмиттанса пучка циклотрона.

В циклотроне СС-30/15 вторая гармоника магнитного поля вводится специально для обеспечения перестройки изохронизма для двух ускоряемых частиц, и амплитуда ее значительна. Действительно, на рис. 5 приведена диаграмма устойчивости при искусственном удалении второй гармоники из рабочего магнитного поля, которая в данном случае имеет концентрические замкнутые кривые (в отличие от типичных эллиптических кривых при наличии второй гармоники в магнитном поле, как на рис. 4, 7). Таким образом, условия для возбуждения когерентных колебаний из-за близости частоты радиальных колебаний к единице отсутствуют.

Для устранения проблемы недопустимого роста амплитуды радиальных колебаний в зоне выпуска были приняты следующие меры. Во-первых, удалось обеспечить изме-



Рис. 5. Диаграмма устойчивости в исходном магнитном поле для конечной энергии протонов 30,0 МэВ и искусственно обнуленной второй гармоники

нения магнитной структуры в центральной области циклотрона при сохранении величины зазора между секторами 40 мм. Во-вторых, было увеличено нарастание угловой протяженности сектора в зоне выпуска. Все это привело к возрастанию частоты радиальных колебаний и уменьшению роста амплитуды в процессе ускорения. В-третьих, для увеличения конечного радиуса циклотрона и сдвига в сторону больших радиусов зоны спада магнитного поля был увеличен максимальный радиус поворотного шимма.

ДИНАМИКА ПУЧКА В СФОРМИРОВАННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЦИКЛОТРОНА

Заключительные результаты формирования магнитного поля циклотрона приведены на следующих рисунках: движение рабочей точки в процессе ускорения ионов H^- (рис. 6); диаграммы устойчивости в результирующем магнитном поле для конечной энергии 30 и 31,5 МэВ (рис. 7); рост амплитуды радиальных колебаний (рис. 8); радиальные эмиттансы внешнего пучка протонов (рис. 9).

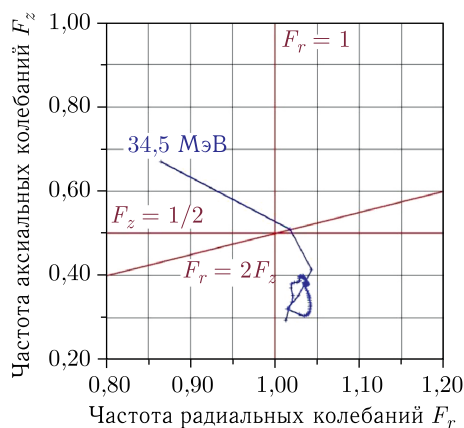


Рис. 6. Движение рабочей точки в процессе ускорения ионов H^- . Заметен существенный сдвиг кривой вправо относительно исходного варианта магнитного поля (см. рис. 2)

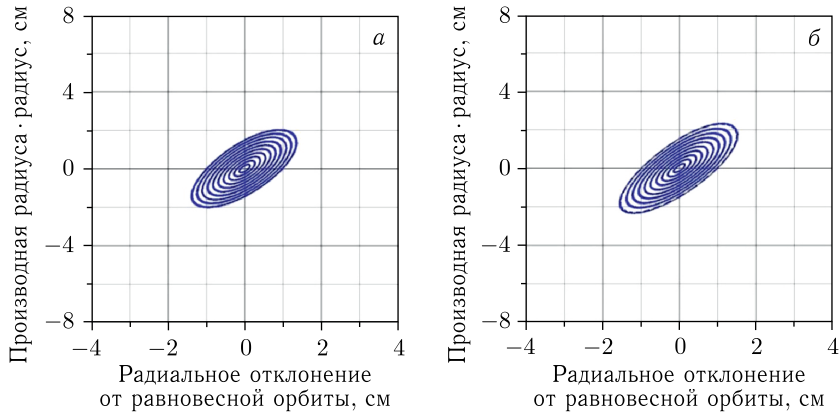


Рис. 7. Диаграммы устойчивости в результирующем магнитном поле для конечной энергии протонов 30,0 (а) и 31,5 МэВ (б)

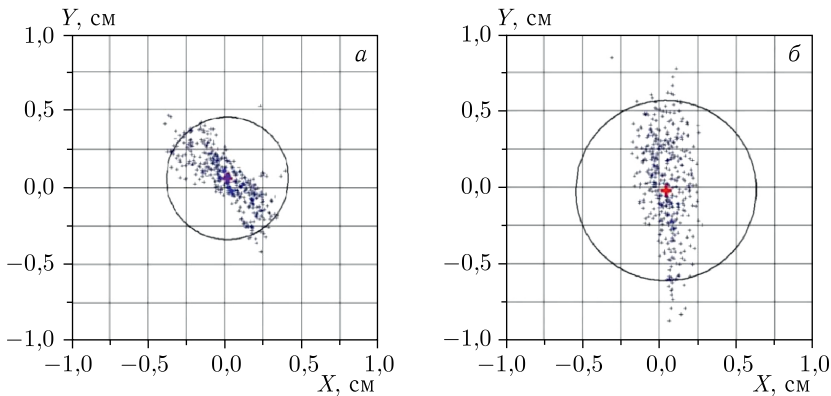


Рис. 8. Рост амплитуды радиальных колебаний в сформированном магнитном поле. Показаны зоны центров траекторий пучка, ускоренного до энергии 1 (а) и 30 МэВ (б)

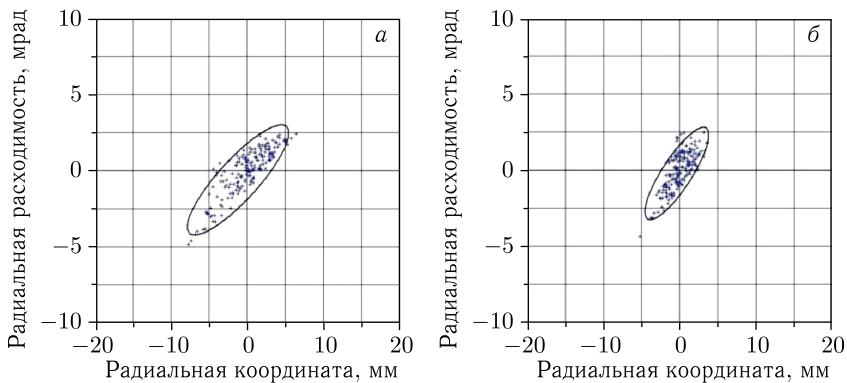


Рис. 9. Радиальный эмиттанс внешнего пучка протонов с энергией 30 МэВ после обдирки на фольге при реальной второй гармонике ($12,4\pi$ мм · мрад для 95 % частиц) (а) и при искусственно обнуленной гармонике ($7,0\pi$ мм · мрад для 95 % частиц) (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате контроля радиальной фокусировки в конечной зоне ускорения удалось избежать недопустимого роста амплитуды радиальных колебаний в режиме ускорения ионов H^- . Величина радиального эмиттанта из-за наличия второй гармоники магнитного поля в процессе ускорения выросла менее чем в 2 раза (см. рис. 9).

Основное внимание при расчетах было уделено протонному режиму с высоким током внешнего пучка. Аналогичный комплекс расчетов был сделан и для дейтронного режима, для которого также была обеспечена устойчивость ускорения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bogdanov P. V. et al.* MCC-30/15 Cyclotron — Parameters, Adjusting Works and Their Results // Proc. RuPAC-2010, Protvino, 2010. FRCHA03. P. 408–410.
2. *Osina Yu. K. et al.* Cyclotron System for Thailand Institute of Nuclear Technology // Proc. RuPAC-2018, Protvino, 2018. TUPSA43; Medical and Industrial Applications. P. 233–235.
3. *Kleeven W. J. G. M., Hagedoorn H. L., Milton B. F., Dutto G.* The Influence of Magnetic Field Imperfections on the Beam Quality in an H^- Cyclotron // Proc. 13th Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Appl., Vancouver, 1992. IXA-02. P. 380–383.

Получено 28 октября 2024 г.