

# Анализ потерь $\text{H}^-$ -ионов из-за электродиссоциации и их влияние на выбор магнитной структуры изохронных циклотронов

Н.К. Абросимов, С.А. Артамонов, В.А. Елисеев, Г.А. Рябов  
Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова РАН,  
Гатчина, Россия

Как известно, метод ускорения  $\text{H}^-$ -ионов в циклотроне позволяет решить проблему 100 % вывода интенсивных пучков переменной энергии. Вместе с тем ускорение ионов с отрицательным зарядом требует решения ряда дополнительных проблем, основными из которых являются их электродиссоциация в магнитном поле и большие сечения рассеяния на молекулах остаточного газа.

Настоящая работа посвящена анализу диссоциации  $\text{H}^-$ -ионов в магнитном поле изохронного циклотрона в Гатчине [1] и выбору магнитной структуры, обеспечивающей радиационную чистоту ускорителя в сочетании с предельно высокой для данного магнита энергией ускоряемых ионов.

Диссоциация связана с тем фактом, что второй электрон иона имеет очень малую энергию связи  $\epsilon_0 = 0.755$  эВ [2], и поэтому велика вероятность его отрыва электрическим полем  $E$ , которое возникает в системе отсчета, связанной с ионом, при его движении со скоростью  $\vec{v}$  в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ :

$$E = 0.3 \beta \gamma B,$$

где  $\beta$  — относительная скорость иона;  $\gamma$  — релятивистский фактор;  $B$  измеряется в кГс,  $E$  — в МВ/см.

Расчет потерь интенсивности  $I$  отрицательных ионов за счет электрической диссоциации будем проводить, исходя из соотношения

$$\frac{dI}{I} = -\frac{dt}{\gamma\tau},$$

где  $\tau$  — среднее время жизни отрицательного иона, определяемое вероятностью проникновения внешнего электрона через потенциальный барьер при наличии электрического поля (1). Величина  $\tau$  может быть представлена в виде

$$\tau(E) = \frac{A}{E} \exp\left[\frac{D}{E}\right],$$

где коэффициенты  $A$  и  $D$  являются константами, которые наилучшим образом аппроксимируют соответствующие опытные данные.

В процессе работы были обнаружены существенные расхождения в значениях коэффициентов  $A$  и  $D$  формулы (3), приводимых в литературе, что связано с появлением новых экспериментальных данных по электродиссоциации  $\text{H}^-$ -ионов [3–7]. Наиболее поздние значения этих констант приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов  $A$  и  $D$ , использованные в расчетах. Коэффициент  $A$  измеряется в с·МВ/см, а коэффициент  $D$  — в МВ/см.

Коэффициент	Номер варианта и ссылка		
	1	2	3
	[ 5 ]	[ 6 ]	[ 7 ]
$A \cdot 10^{-14}$	1.05	7.96	2.47
$D$	49.25	42.56	44.90

Для расчета потерь, преобразовывая выражение (2) к виду, наиболее подходящему для циклотронного режима ускорения, можно получить

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-\int_0^{\theta_k} \alpha(\theta) d\theta\right) = \exp\left(-N \sum_{i=1}^M \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \alpha(\theta) d\theta\right),$$

где

$$\alpha = \frac{1}{\gamma\omega\tau},$$

$\theta_k$  — конечное значение угла  $\theta$  на последнем обороте;  $\omega$  — циклическая частота обращения этого иона, которая в изохронном циклотроне является постоянной величиной;  $N$  — число элементов периодичности магнитной структуры ( в нашем случае  $N = 4$  );  $\theta_{i-1} = \frac{2\pi}{N}(i-1)$ ,  $\theta_i = \frac{2\pi}{N}i$ ;  $M$  — число оборотов, определяемое как  $M = \frac{W_k}{\left(\frac{dW}{dM}\right)} = \frac{W_k}{(\Delta W)_0}$ ;  $W_k$  — конечная энергия иона;  $(\Delta W)_0$  — приращение энергии за оборот.

Основные параметры магнитного поля циклотрона были выбраны следующими: магнитная жесткость на конечном радиусе  $r_k = 0.9$  м равна 13.2 кГс·м, что соответствует энергии 80 МэВ и уровню поля  $\langle B_k \rangle = 14.67$  кГс при его значении в центре  $B_0 = 13.52$  кГс. Магнитное поле определялось по формуле

$$B(r, \theta) = \langle B(r) \rangle \cdot \{1 + A_4(r) \cdot \cos [N\theta - \psi(r)]\},$$

где  $\langle B(r) \rangle$  — среднее магнитное поле в зависимости от радиуса;  $A_4(r)$  — амплитуда;  $\psi(r)$  — фаза основной 4-й гармоники. Рассматривались два варианта магнитной структуры, которые имеют вблизи конечного радиуса следующие параметры [8]: вариант М1 с флаттером  $F \sim 0.04$ , углом спиральности  $\gamma_0 \sim 55^\circ$ , амплитудой основной гармоники  $A_4 \sim 4.15$  кГс; вариант М2 с флаттером  $F \sim 0.025$ , спиральностью  $\gamma_0 \sim 65^\circ$ , и амплитудой  $A_4 \sim 3.28$  кГс. Оба варианта рассмотренных структур характеризуются одинаковым ростом среднего поля по радиусу и обеспечивают необходимую z-фокусировку. Основные отличия состоят в величине максимального поля в холмах и в углах спиральности.

Время жизни  $H^-$ -иона в Гатчинском циклотроне в зависимости от энергии, рассчитанное по среднему полю и по полю в холмах для магнитной структуры М1, приведено в табл. 2.

Таблица 2. Среднее время жизни  $\tau$  в зависимости от энергии ускоряемых  $H^-$ -ионов, вычисленное по среднему полю и по полю в холмах циклотрона (варианты параметров  $A, D : 1, 2, 3$ ) для магнитной структуры M1.

W, МэВ	R, см	$\tau$ , сек					
		1	2	3	по среднему полю		
					1	2	3
40.1	65.6	0.13	0.02	0.02	$1.10 \cdot 10^3$	$3.92 \cdot 10^1$	$7.92 \cdot 10^1$
45.1	69.3	0.02	$0.26 \cdot 10^{-2}$	$0.32 \cdot 10^{-2}$	$8.54 \cdot 10^1$	4.30	7.70
50.1	72.7	$0.31 \cdot 10^{-2}$	$0.59 \cdot 10^{-3}$	$0.66 \cdot 10^{-3}$	9.73	0.65	1.06
55.1	76.0	$0.70 \cdot 10^{-3}$	$0.16 \cdot 10^{-3}$	$0.17 \cdot 10^{-3}$	1.48	0.13	0.19
60.1	79.1	$0.19 \cdot 10^{-3}$	$0.53 \cdot 10^{-4}$	$0.53 \cdot 10^{-4}$	0.29	$0.30 \cdot 10^{-1}$	$0.40 \cdot 10^{-1}$
65.1	82.0	$0.62 \cdot 10^{-4}$	$0.20 \cdot 10^{-4}$	$0.19 \cdot 10^{-4}$	$0.66 \cdot 10^{-1}$	$0.85 \cdot 10^{-2}$	$0.10 \cdot 10^{-1}$
70.1	84.8	$0.23 \cdot 10^{-4}$	$0.84 \cdot 10^{-5}$	$0.75 \cdot 10^{-5}$	$0.18 \cdot 10^{-1}$	$0.27 \cdot 10^{-2}$	$0.33 \cdot 10^{-2}$
75.1	87.4	$0.94 \cdot 10^{-5}$	$0.39 \cdot 10^{-5}$	$0.33 \cdot 10^{-5}$	$0.54 \cdot 10^{-2}$	$0.98 \cdot 10^{-3}$	$0.11 \cdot 10^{-2}$
80.1	90.0	$0.42 \cdot 10^{-5}$	$0.19 \cdot 10^{-5}$	$0.16 \cdot 10^{-5}$	$0.19 \cdot 10^{-2}$	$0.38 \cdot 10^{-3}$	$0.42 \cdot 10^{-3}$

Исходя из данных табл. 2, можно сделать следующие выводы: а) время жизни становится сравнимым со временем ускорения ( $10^{-5}$  сек.) при энергиях  $> 60$  МэВ; б) время жизни в холме примерно в 200–450 раз ниже, чем время жизни, рассчитанное по среднему полю, и является определяющим для расчёта потерь; в) для варианта 1 параметров диссоциации  $A$  и  $D$  получается в 2–4 раза большее время жизни по сравнению с вариантами 2 и 3, которые дают близкие к друг другу значения.

В табл. 3 приведены результаты расчета потерь для двух вариантов магнитной структуры при различных темпах прироста энергии за оборот.

Таблица 3. Потери  $H^-$  ионов (К,%) из-за электродиссоциации в зависимости от прироста энергии  $(\Delta W)_0$  за оборот для различных структур M1, M2 и для наборов параметров (см. табл.1) 1, 2, 3.

$(\Delta W)_0$ , МэВ		0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
M1, К	1	20.0	10.6	7.2	5.5	4.3
	2	44.5	25.6	17.8	13.8	10.9
	3	48.5	28.3	19.8	15.4	12.2
M2, К	1	4.7	2.3	1.6	1.2	0.9
	2	14.3	7.4	5.0	3.8	3.0
	3	15.0	7.7	5.3	4.0	3.2

На основании данных табл. 3 можно сделать следующие выводы.

- Параметры  $A$  и  $D$  варианта 1 приводят к значительно более низким значениям потерь за счет диссоциации  $H^-$ -ионов по сравнению с вариантами 2 и 3, которые дают близкие друг к другу значения. В связи с этим при проектировании циклотрона было решено ориентироваться на более поздние и достоверные, но в то же время менее оптимистические варианты 2 и 3. Такой подход позволяет увеличить надежность проекта.

• При темпе прироста энергии  $(\Delta W)_0$  более 200 кэВ/об. потери слабо зависят от него, поэтому в действующей машине  $(\Delta W)_0$  должен быть  $\geq 200$  кэВ/об.

• Сравнение результатов расчетов для структур М1 и М2 убедительно свидетельствует о явных преимуществах сильно спиральной магнитной структуры М2 по сравнению со структурой М1. Увеличение угла спиральности  $\gamma_0$  на  $\sim 10^0$  позволяет несколько уменьшить амплитуду вариации основной гармоники магнитного поля и тем самым значительно снизить потери  $H^-$  ионов. Использование магнитной структуры М2 с высокой спиральностью позволяет ограничить потери на электродиссоциацию в Гатчинском изохронном циклотроне величиной  $< 5\%$ .

Резюмируя опыт разработки Гатчинского циклотрона с точки зрения анализа электродиссоциации  $H^-$ -ионов, можно сформулировать два основных вывода.

Во-первых, следует отметить, что существует расхождение в литературных данных относительно значений параметров диссоциации  $A$  и  $D$ . Наиболее достоверными представляются параметры работ [6,7], которые дают практически совпадающие между собой численные результаты в интересующей нас области изменения  $E$ .

Во-вторых, для достижения максимально возможной энергии ускоряемых  $H^-$ -ионов в данном магните, при условии ограничения их потерь на электродиссоциацию, целесообразно использовать магнитную структуру с малой величиной флаттера и большой спиральностью. В то же время следует подчеркнуть, что такая структура является более сложной в технологическом плане.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Abrossimov N.K. et al. // Proc. XIII Int. Conf. on Cycl. and their Applic., Vancouver, Canada, 6-10 July 1992, p.58-62.
2. L.R.Scherk. An improved value for the electron affinity of the negative hydrogen ion. // Can. J. Phys., v.57, 1979, p.558.
3. R.P.Haddock et al. // Proc. of the Int. Conf. on High Energy Accel., Dubna, August 21-27, 1963, Atomizdat, M., 1964, p.568.
4. J.R.Richardson. Sector Focusing Cyclotrons. // Progres in Nuclear Technignes and Instrumentation, North-Holland, v.1, 1965, p.85-88.
5. Б.П.Мурин и др. Линейные ускорители ионов, т.1. Проблемы и теория. М, 1978, с.154.
6. G.M.Stinson et al. // NIM, v.74, 1969, p.333-341  
В.В.Кольга и др., ОИЯИ, Р9-88-637, Дубна, 1988.
7. R.T.Lee. TRIUMF, TRI-DN-89-32, Canada, 1989.
8. Н.К.Абросимов и др. ПИЯФ, NP-22-1995, N 2049, Гатчина, 1995.