

# Потери пучка $H^-$ -ионов на остаточном газе изохронного циклотрона в Гатчине

А.В. Зубарев

*Петербургский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова,  
Гатчина, Россия*

## Введение

В ПИЯФ РАН сооружается изохронный циклотрон для ускорения ионов  $H^-$  [1]. Планируется получить пучок протонов с интенсивностью 100 мкА и энергией до 80 МэВ, с целью использовать его для производства изотопов, лечения рака глаза и для задач фундаментальной и прикладной физики.

При ускорении слабосвязанных  $H^-$  (энергия связи внешнего электрона 0,75 эВ) возникает ряд проблем, одна из которых — высокая вероятность развала ионов на молекулах остаточного газа, что может повлечь за собой сильную активацию циклотрона продуктами развала. В этой связи были рассчитаны потери пучка  $H^-$  на остаточном газе, и по результатам расчета сформулированы требования к рабочему вакууму ускорителя.

## 1. Данные по сечениям развала $H^-$

Различают два канала реакции развала  $H^-$  в соударении с молекулой мишенью в зависимости от того, теряет ли  $H^-$  в соударении 1 или же 2 своих электрона. При этом обычно употребляемые обозначения для сечений отдельных каналов —  $\sigma_{-10}$  и  $\sigma_{-11}$  соответственно. Как правило,  $\sigma_{-10}$  превосходит  $\sigma_{-11}$  более чем на порядок и может быть взято за полное сечение развала как хорошее приближение.

### 1.1. Энергии выше 1 МэВ

Для расчета потерь в процессе ускорения необходимо знание сечений в интервале до 80 МэВ. Для энергий выше 1 МэВ теория (например, [2]) дает простую зависимость, получающуюся при расчете методом борновских приближений,

$$\sigma = A/v^2, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — полное сечение развала;  $v$  — скорость иона;  $A$  — не зависящая от скорости постоянная, своя для каждого газа мишени.

Имеются скудные экспериментальные данные по развалу  $H^-$  на газе при энергиях выше 1 МэВ. Имеющиеся данные по развалу на водороде в интервале 4–18 МэВ [3] подтверждают зависимость (1) с точностью 10%. При расчетах мы пользовались выражением (1) с постоянной  $A$ , вычисленной по данным экспериментов [3] и [4]. При отсутствии экспериментальных данных использовались данные теоретического расчета [2]. Сечения для молекул брались как суммы сечений для составляющих их атомов. В табл.1 представлены значения постоянной  $A$  для атомов некоторых молекул мишеней.

Ряд авторов [5] при расчетах потерь принимали  $A = \kappa \cdot M$ , где  $M$  — масса молекулы;  $\kappa$  — постоянная, общая для всех газов. Как можно усмотреть из таблицы, такая зависимость находится в согласии с экспериментом для мишеней тяжелее  $He$ . Имеющиеся заметные расхождения в данных для водорода в нашем случае не отразились на результатах для потерь, так как при любом варианте потери на водороде оказываются пренебрежимо малыми.

Таблица 1: Значения постоянной  $A$  ( $см^4/с^2$ ) в уравнении (1); [3,4] — эксперимент, [2] — теория.

Атом Молекулы Мишени	Ссылка		
	[3]	[4]	[2]
$H$	$44 \pm 5$	$74 \pm 10\%$	81
$He$	$84 \pm 8$	$92 \pm 10\%$	92
$C$	—	—	564
$N$	$504 \pm 56$	$574 \pm 10\%$	630
$O$	$576 \pm 64$	—	656
$Ar$	$1560 \pm 200$	$1440 \pm 10\%$	2200
$Kr$	—	—	5124
$Xe$	—	—	10611

## 1.2. Энергии ниже 1 МэВ

Для циклотрона планируется внешняя аксиальная инжекция ионов. Длина тракта инжекции невелика  $\sim 5$  м, однако сечения развала в области малых энергий принимают свои максимальные значения. Поэтому потери пучка при инжекции также исследовались. Для энергий ионов ниже 1 МэВ борновское приближение и с ним выражение (1) неприменимы. Здесь, однако, имеется достаточное число экспериментальных данных по сечениям развала, суммированных, например в [6]. Особенностью развала  $H^-$  при энергиях 1–100 КэВ можно назвать примерное постоянство сечений по всему интервалу энергий и примерное равенство их для различных молекул-мишеней.

В табл.2 представлены сечения развала при энергии 20 КэВ (энергия инжекции).

Таблица 2: Парциальные и полные сечения развала  $H^-$  на молекулах некоторых газов при энергии ионов 20 КэВ [6].

Газ	$\sigma_{-10}[10^{-15}см^2]$	$\sigma_{-11}[10^{-15}см^2]$	$\sigma[10^{-15}см^2]$
$H_2$	1.0	0.025	1.03
$H_2O$	0.8	0.08	0.88
$N_2$	1.5	0.15	1.65
$O_2$	1.0	0.15	1.15
Ar	1.5	0.15	1.65

## 2. Метод и результаты вычислений

Потери пучка  $dj$  при прохождении его через слой смеси газов толщиной  $dZ$  могут быть описаны следующим выражением:

$$dj = -j \cdot N_L \cdot P_0 \cdot \sum_i a_i \cdot \sigma_i \cdot dZ, \quad (2)$$

где  $j$  — интенсивность пучка;  $P_0$  — полное давление смеси;  $N_L$  — число Лошмидта;  $\sigma_i = \sigma_{-10} + \sigma_{-11}$  — полное микроскопическое сечение развала  $H^-$  на  $i^{o\text{м}}$  газе;  $a_i$  — удельный вес  $i^{o\text{м}}$  газа (отношение парциальной концентрации к полной).

### 2.1. Потери в процессе ускорения

Простой вид зависимости (1) позволяет сосчитать потери аналитически. Несложными преобразованиями выражение (2) с учетом (1) может быть приведено к виду

$$dj = -\frac{N_L}{c} \cdot P_0 \sum_i a_i \cdot A_i \cdot \frac{1}{f \cdot W} \cdot \frac{E}{\sqrt{E^2 - E_0^2}} \cdot dE, \quad (3)$$

где  $W$  — прирост энергии за оборот;  $f$  — частота обращения частицы;  $c$  — скорость света;  $A_i$  — значение постоянной  $A$  для  $i^{2o}$  газа;  $E$  — полная энергия частицы ( $E = E_{kin} + E_0$ ,  $E_0 = 938$  МэВ — энергия покоя  $H^-$ ). После интегрирования (3) от  $E_{initial}$  до  $E_{final}$  (от начального до конечного значений полной релятивистской энергии ионов) интегральные потери пучка в процессе ускорения даются выражением

$$j = j_0 \cdot \exp - \left( \frac{N_L}{c} \cdot P_0 \sum_i a_i \cdot A_i \cdot \frac{1}{f \cdot W} \cdot \sqrt{E^2 - E_0^2} \right) \Big|_{E_{init}}^{E_{fin}}, \quad (4)$$

где  $j_0$  и  $j$  — начальная и конечная интенсивности пучка. При выводе предполагалось, что давление постоянно по всему объему камеры ускорителя. Результаты вычислений представлены на рис. 1 и в табл. 3.

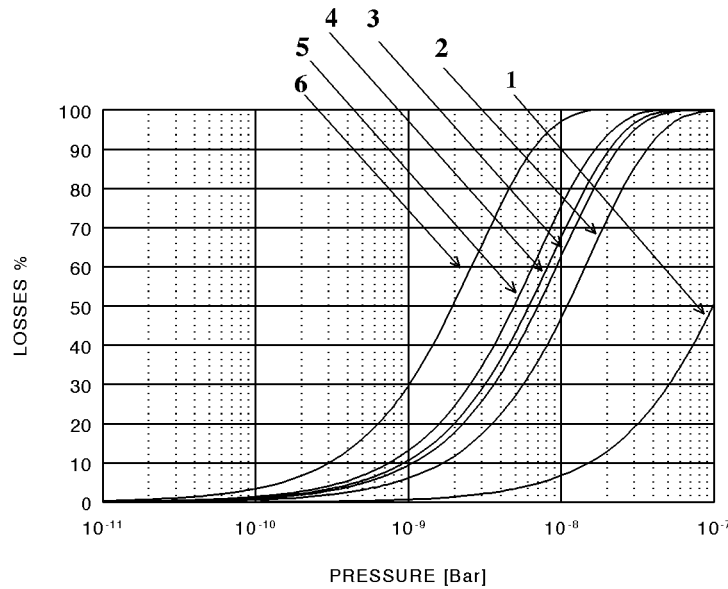


Рис.1: Потери  $H^-$  на некоторых газах (проценты) при ускорении в циклотроне;  $E_{kin}^{max} = 80$  МэВ;  $f = 20$  МГц;  $W = 200$  КэВ/об; 1 —  $H_2$ ; 2 —  $H_2O$ ; 3 —  $N_2$ ; 4 —  $O_2$ ; 5 — ( $Ar, CO_2$ ); 6 — ( $M = 100$ ); сечение для  $H_2$  взято из [3].

Таблица 3: Потери  $H^-$  на некоторых газах (проценты) при ускорении в циклотроне;  $E_{kin}^{max} = 80$  МэВ,  $f = 20$  МГц,  $W = 200$  КэВ/об; сечение для  $H_2$  взято из [3].

Давление [бар]	$H_2$	$H_2O$	$N_2$	$O_2$	Ar
$1 \cdot 10^{-10}$	00.0	00.6	00.9	01.1	01.4
$3 \cdot 10^{-10}$	00.2	01.8	02.9	03.3	04.1
$5 \cdot 10^{-10}$	00.3	03.1	04.8	05.4	06.8
$7 \cdot 10^{-10}$	00.4	04.3	06.6	07.6	09.4
$9 \cdot 10^{-10}$	00.6	05.5	08.5	09.6	11.9
$1 \cdot 10^{-9}$	00.7	06.1	09.4	10.6	13.1
$3 \cdot 10^{-9}$	02.0	17.3	25.6	28.7	34.5

## 2.2. Потери в тракте инжекции

В тракте инжекции энергия пучка — постоянная величина, и потери могут быть со- считаны прямым интегрированием выражения (2) с использованием сечений из табл. 2. Результаты для азота представлены в табл. 4.

Таблица 4: Потери  $H^-$  на  $N_2$  в тракте инжекции; энергия — 20 КэВ, длина — 5 м.

Давление $N_2$ [бар]	$1 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-10}$	$9 \cdot 10^{-10}$
Потери, %	0.2	0.6	1.1	1.5	1.9

## Заклучение

В соответствии с требованиями к радиационной чистоте ускорителя и с учетом потерь на электродиссоциацию  $H^-$  в магнитном поле [7] желательно, чтобы потери пучка на остаточном газе не превышали 5%.

Потери при ускорении быстро растут с ростом молекулярной массы остаточного газа, что делает их величину чувствительной к парциальному составу вакуума ускорителя. Следует ожидать, что главными парциальными составляющими вакуума циклотрона будут  $N_2$ ,  $O_2$  и  $H_2O$ , причем вода может преобладать, вследствие ее медленной десорбции с поверхностей откачиваемого объема [8].

Как можно заключить на основе данных табл.3, для того чтобы потери на газе не превышали 5%, рабочий вакуум в камере циклотрона должен поддерживаться на уровне не ниже  $(5 - 7) \cdot 10^{-7}$  мбар. Расчетные потери в тракте инжекции (малые энергии ионов) оказываются слабо зависящими от парциального состава остаточного газа и при тех же рабочих давлениях  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  мбар не превышают 1-2%.

## Список литературы

1. Abrossimov.N.K. et.al. Proc. XIII. Conf. on Cycl. end their Apl., Vancouver, Canada, 6-10 July, 1992, P. 58.
2. Gilespe G.H. // Phis. Rev. A, 1977, v16, No 3, p. 943.
3. Smythe.R., Toevs J.V. // Phis. Rev., 1965, v139, No 1A, p. A15.
4. Berkner.K.H et.al. // Phis. Rev., 1964, v134, No 6A, p. A1461.
5. Гельфанд.Е.К и др. // ЖТФ, 1975, т.XLV, вып.1, с.74.
6. Nakai.Y et al. // Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1987, v37, p. 69.
7. Abrossimov.N.K. et.al. PNPI Reserch Report 1994-1995, p.275.
8. Benvenuty.C. IEEE Trans., 1979, v NS - 26, No 2, p. 2128.