

P9-2002-58

В. В. Калиниченко, Г. А. Карамышева

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ИОНОВ
ВСЛЕДСТВИЕ ПЕРЕЗАРЯДКИ
НА ОСТАТОЧНОМ ГАЗЕ
В КАМЕРЕ ЦИКЛОТРОНА

Введение

При проектировании и проведении пусконаладочных работ ускорителей тяжёлых ионов существенное значение приобретают численные расчёты потерь интенсивности пучка в результате перезарядки ионов на остаточном газе. В основном исходя из этих потерь выдвигаются требования к вакууму в камере циклотрона.

В данной работе представлены результаты расчётов потерь пучка ионов ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$ вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона, ускоряющего ионы от энергии 0.003 МэВ/нуклон до 2.4 МэВ/нуклон. Расчёты проводились для оценки требований к величине вакуума при различных значениях напряжения на дуантах с целью определения возможности уменьшения рабочего ускоряющего напряжения.

Методика расчётов

Для расчётов была написана программа KRYC в интегрированном математическом пакете MATLAB, позволяющая вычислять траектории движения ионов в динамическом режиме.

Моделирование динамики частиц осуществлялось в поле, полученном в результате последних измерений на магните циклотрона [1]. Для расчётов в центральной области использовалась 3-мерная карта [2] электрического поля, рассчитанная для спроектированной геометрии электродов. В зоне ускорения электрическое поле аппроксимировалось аналитическими формулами [3]. В зоне вывода располагались расчётные карты полей выводных устройств [4]. На рис.1 показаны траектории 740 частиц для всей области ускорения, включая выводные устройства, для проектного ускоряющего напряжения 50 кВ. Потери на остаточном газе оценивались в подпрограмме KRYLOSS в процессе расчётов динамики пучка по программе KRYC.

Сечения перезарядки ионов на остаточном газе

Величина потерь интенсивности пучка ионов вследствие перезарядки на остаточном газе зависит от полного сечения перезарядки, давления в камере циклотрона и длины пути, пройденного пучком в ускорителе. Давление в камере полагалось постоянным, не зависящим от радиуса. Так как в данном циклотроне применяется внешняя инжекция, такое приближение полагаем допустимым.

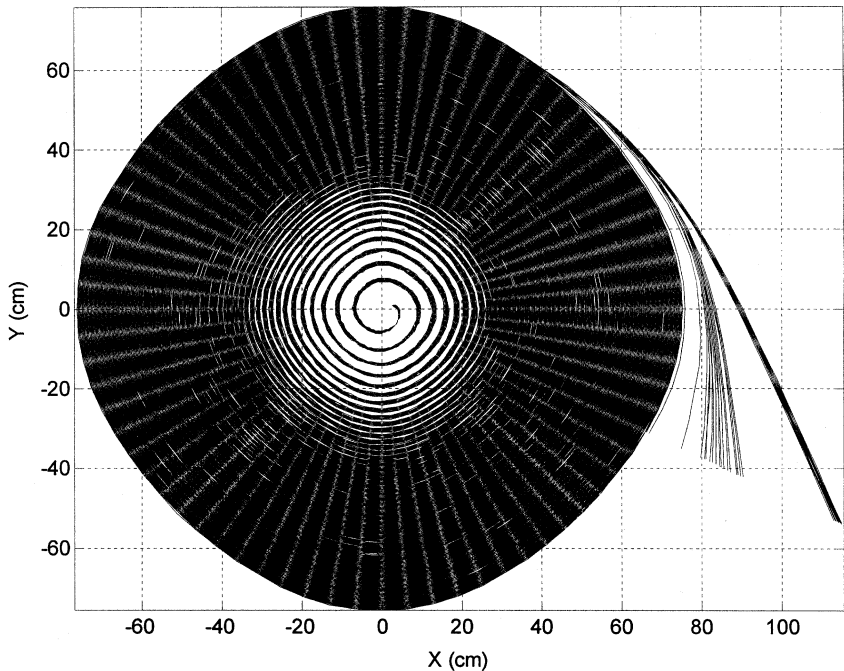


Рис.1. Траектории частиц для всей области ускорения

Полное сечение перезарядки иона на остаточном газе зависит от атомного номера и заряда ускоряемого иона, типа остаточного газа, энергии ускоряемых частиц, оно считалось равным сумме двух сечений: сечения захвата одного электрона и сечения потери одного электрона. Предполагалось, что остаточный газ – азот.

Как и в работах [5,6], расчёты сечений перезарядки проводились по полуэмпирическим формулам для различных диапазонов энергий.

Для энергий $E \leq 0,006$ МэВ/нукл. сечение перезарядки вычислялось по известной эмпирической формуле работы [7]:

$$\sigma_{z,z-1} = 1.43 * 10^{-12} z^{1.17} R^{-2.76},$$

z – заряд иона, $R[\text{эВ}]$ – первый потенциал ионизации остаточного газа, $\sigma_{z,z-1}$ [см²/мол.] – сечение захвата. При этом полное сечение $\sigma_0 = \sigma_{z,z-1}$ (сечением потерь пренебрегаем, так как сечение захвата при таких энергиях много больше сечения потерь).

Далее, до энергии 0,5 МэВ/нукл сечение перезарядки вычислялось согласно [8]:

$\sigma(E) = \sigma_0 e^{-\gamma E}$, где γ – константа, зависящая от σ_0 и σ_k (σ_k – сечение при $E=0,5$ МэВ).

Для диапазона энергий 0,5÷1,4 МэВ/нукл. применялись формулы работы [9]:

$$\sigma_{z,z-1} = 2 * 10^{-15} z^2 (137 \beta)^{-5},$$

$$\sigma_{z,z+1} = 2 * 10^{-15} (1+z)^2 (137 \beta)^{-5} * \exp\left(-\frac{2(z-\bar{z})+1}{2 * 0,27^2 * A}\right),$$

где $\bar{z} = A\{1 - \exp(-137 \beta \delta)\}$, β – относительная скорость (v/c),

$$\delta = 0,3443 - 0,0667 \ln(A), A - \text{атомный номер ускоряемых ионов}$$

$$\sigma = \sigma_{z,z-1} + \sigma_{z,z+1}$$

и для сравнения эмпирическая зависимость тех же авторов [9]:

$$\sigma = 6,1 * 10^{-17} \exp\left\{-z(-0,25 + 0,32 E - 0,14 E^2 + 0,0123 E^3)\right\}$$

$E[\text{МэВ/нуклон}]$ – энергия ионов.

Оба варианта показали аналогичный результат.

При энергиях больше 1,4 МэВ/нукл. использовались формулы работы [10]:

$$\sigma_{z,z+1} = 9 * 10^{-19} z^{\frac{2}{5}} \beta^{-2},$$

$$\sigma_{z,z-1} = 3 * 10^{-28} z^{\frac{5}{2}} \beta^{-7},$$

$$\sigma = \sigma_{z,z-1} + \sigma_{z,z+1}.$$

Расчёты коэффициента прохождения пучка в камере циклотрона

Коэффициент прохождения пучка T по длине пути L рассчитывался по формуле [5]:

$$T = e^{-3,3 * 10^{16} \int_0^L P \sigma(\beta) dl},$$

где P – давление остаточного газа в торр, dl – элемент длины пути иона в сантиметрах, σ – полное сечение перезарядки иона на остаточном газе в $\text{см}^2/\text{молекула}$.

Были рассчитаны коэффициенты прохождения пучка ионов в камере циклотрона для различных значений ускоряющего напряжения и давлений остаточного газа.

На рисунке 2 показан коэффициент прохождения в зависимости от радиуса при различных давлениях в камере циклотрона и проектном значении ускоряющего напряжения 50 кВ. Видно, что основные потери приходятся на центр циклотрона, где энергия ионов маленькая и, соответственно, велико сечение захвата электрона.

На рисунке 3 показана зависимость коэффициента прохождения от давления в камере ускорителя. Даны результаты трёх вариантов расчёта: для проектного ускоряющего напряжения - 50 кВ и напряжений 40 кВ и 60 кВ. Уменьшение ускоряющего напряжения приводит к увеличению потерь, что связано с удлинением траектории из-за роста числа оборотов. Из рисунка 3 видно, что при давлении в камере циклотрона $2 \cdot 10^{-7}$ торр коэффициент прохождения ионов ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$ равен 92% для ускоряющего напряжения 60 кВ, 91% для $V=50$ кВ и 89% для $V=40$ кВ, а при давлении в 10^{-6} торр коэффициент прохождения равен 68% для $V=60$ кВ, 63% для $V=50$ кВ, и 56% для $V=40$ кВ.

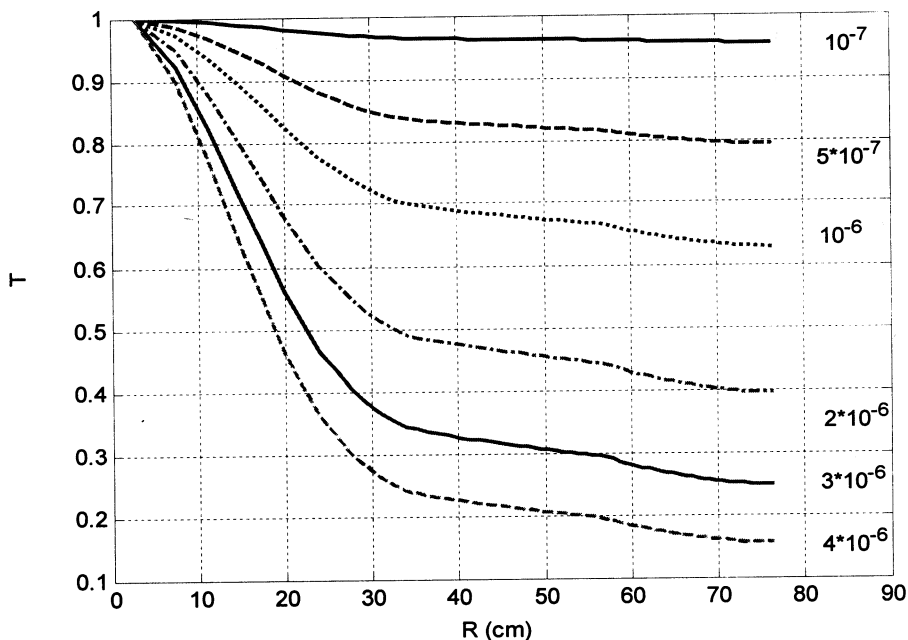


Рис.2. Зависимость коэффициента прохождения от радиуса ускорителя (справа от кривых указаны величины давления остаточного газа в камере в торр)

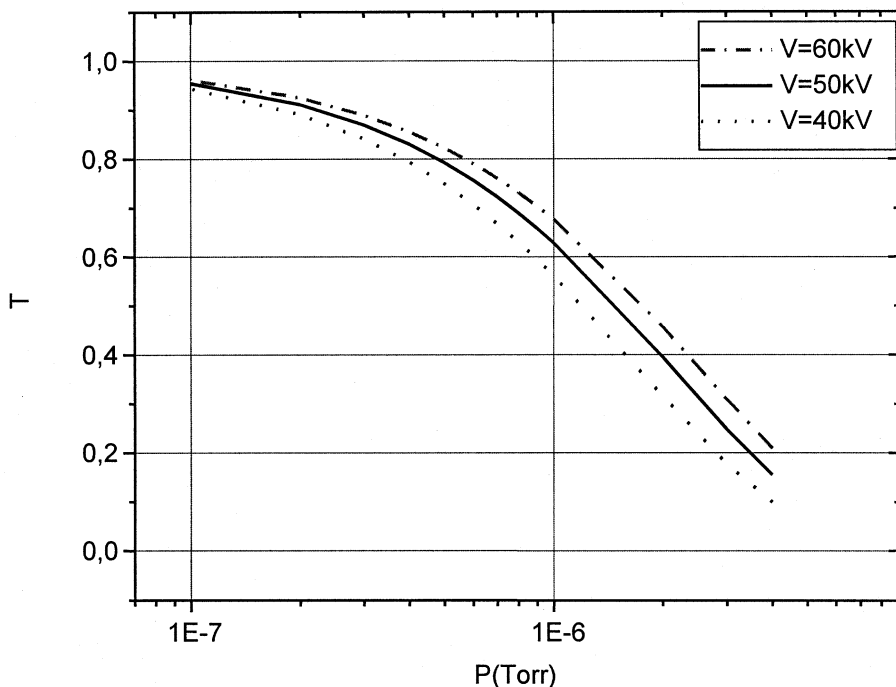


Рис.3. Зависимость коэффициента прохождения от давления в камере ускорителя для различных ускоряющих напряжений

Заключение

Коэффициент прохождения ионов ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$ более 60% достигается при условиях: давление в камере не превышает 10^{-6} торр для проектного ускоряющего напряжения 50 кВ и $9 \cdot 10^{-7}$ торр для $V=40$ кВ. Таким образом, уменьшение ускоряющего напряжения до 40 кВ приведёт к уменьшению интенсивности пучка примерно на 8% от начальной интенсивности по сравнению с проектным значением.

Литература

- 1 Аленицкий Ю.Г., Заплатин Н.Л., “Формирование магнитного поля циклотрона ЦИТРЕК”, внутренний отчёт, август 2001г.
- 2 Самсонов Е.В. Шакун Н.Г. “Расчёт динамики пучка для спроектированной геометрии электродов центральной области циклотрона ЦИТРЕК”, внутренний отчёт, май 2000г.
- 3 N.Hazewindus et al., “The magnetic Analogue Method as Used in the Study of a Cyclotron Central region”, NIM,118(1974), p.125.
- 4 Морозов Н.А., “Расчёты элементов для системы вывода циклотрона ЦИТРЕК”, внутренний отчёт, июнь 1999г.
- 5 A.Tikhomirov et al, “Computer modeling of the beam transmission efficiency dependent on the charge exchange with the residual gas for the CI-100 cyclotron”, in proc. 6th International Computational Accelerator Physics Conference ICAP 2000, Darmstadt, Germany.
- 6 M.N.El-Shazly, G.G.Gulbekian et al, “Beam loss due to the charge exchange with the residual gas in the FLNR heavy ion cyclotrons”, in proc. VI EPAC, 1998, p.2199.
- 7 A.Muller, E.Salzborn, “Scaling of Cross-Sections for Multiple Electron Transfer to Highly Charged Ions Colliding with Atom and Molecules”, Phys.Lett., 1977, 62A, p.391.
- 8 R.A. Gough and M.L. Mallory “Charge Exchange Losses during Cyclotron Acceleration: Experiment and Theory”, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-26, №2, April 1979.
- 9 E.Baron et al, “Charge exchange of very heavy ions in carbon foils and in the residual gas of GANIL cyclotrons”, NIM A328 (1993) 177-182.
- 10 H.C.Hseuh et al, “Ultrahigh vacuum system of the heavy ion transport line at Brookhaven”, IEEE Trans. Nuc. Sci., Vol.NS-32, №5,1985, p.177.

Получено 28 марта 2002 г.

Калиниченко В. В., Карамышева Г. А.
Оценка потерь ионов вследствие перезарядки
на остаточном газе в камере циклотрона

P9-2002-58

Представлены результаты расчетов потерь пучка ионов ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$ вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона, ускоряющего ионы от энергии 0,003 до 2,4 МэВ/нуклон. Коэффициент прохождения ионов ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$ более 60 % достигается при давлении в камере не выше 10^{-6} торр для проектного ускоряющего напряжения 50 кВ и $9 \cdot 10^{-7}$ торр — для $V = 40$ кВ. Уменьшение ускоряющего напряжения до 40 кВ приведет к уменьшению интенсивности пучка примерно на 8 % от начальной интенсивности по сравнению с проектным значением.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Kalinichenko V. V., Karamysheva G. A.
The Estimation of Beam Losses Due to Charge Exchange
with the Residual Gas in a Cyclotron

P9-2002-58

The estimation of beam losses due to charge exchange with the residual gas in a cyclotron intended for acceleration of ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$ ions from energy 0.003 to 2.4 MeV/nucleon is presented. The transmission factor of ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$ ions is greater than 60 % if average pressure is smaller than 10^{-6} Torr for designed accelerating voltage $V = 50$ kV and $9 \cdot 10^{-7}$ Torr for $V = 40$ kV. Accelerating voltage decrease to 40 kV follows to beam intensity increase by 8 % from initial intensity in comparison with the designed value.

The investigation has been performed at the Dzheleпов Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Е. В. Сабеевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 03.06.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,38. Уч.-изд. л. 0,41. Тираж 280 экз. Заказ № 53341.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.