

P9-2011-34

О. В. Карамышев, Г. А. Карамышева, Г. М. Скрипка

**ПОТЕРИ ИОНОВ ВСЛЕДСТВИЕ ПЕРЕЗАРЯДКИ  
НА ОСТАТОЧНОМ ГАЗЕ В КАМЕРЕ ЦИКЛОТРОНА**

Направлено в журнал «Прикладная физика»

Карамышев О. В., Карамышева Г. А., Скрипка Г. М.  
Потери ионов вследствие перезарядки на остаточном газе  
в камере циклотрона

P9-2011-34

В работе описана методика и представлены результаты расчетов потерь пучка тяжелых и легких ионов вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона. Была разработана программа IONLOSS, позволяющая рассчитывать потери пучков ионов при взаимодействии с молекулами остаточного газа в процессе движения пучка.

В качестве примеров приведены результаты расчетов потерь пучков ионов  ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$  и  ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$  при перезарядке в камере циклотрона ЦИТРЕК, ускоряющего ионы до энергии 2,4 МэВ/нуклон, и пучков  $\text{H}_2^+$ ,  ${}^{12}\text{C}^{6+}$ , ускоряемых в камере циклотрона C400 (IBA, Бельгия) до 260 МэВ и 400 МэВ/нуклон соответственно.

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

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2011

Karamyshev O. V., Karamysheva G. A., Skripka G. M.  
Beam Losses Due to Charge Exchange with the Residual Gas  
in the Cyclotron

P9-2011-34

This paper describes methods and results of simulation of light and heavy ion beams losses due to charge exchange with the residual gas in the cyclotron. A code IONLOSS was created which can simulate beam losses due to charge exchange with the residual gas while moving in the vacuum chamber.

The results of simulations of  ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$  and  ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$  ion beams losses in the CYTRACK cyclotron, which accelerates heavy ions up to an energy of 2.4 MeV/u, and losses of  $\text{H}_2^+$ ,  ${}^{12}\text{C}^{6+}$  ions in the C400 cyclotron (IBA, Belgium), which accelerates ions up to 260 MeV and 400 MeV/u, correspondingly, are presented as examples.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2011

## ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и проведении пусконаладочных работ ускорителей тяжелых и легких ионов необходимо производить численные расчеты потерь интенсивности пучка в результате перезарядки ионов на молекулах остаточного газа. В основном исходя из этих потерь определяется требуемый уровень вакуума в камере циклотрона, а они, в свою очередь, определяют необходимую производительность средств вакуумной откачки. Использование оптимальных вакуумных систем циклотронов приводит к снижению их стоимости, что особенно важно при производстве ускорителей, предназначенных для прикладных и медицинских применений.

Для расчета потерь пучков ионов при перезарядке на молекулах остаточного газа в процессе ускорения была разработана программа IONLOSS в интегрированном математическом пакете MATLAB.

В качестве примеров приведены результаты расчетов потерь пучков ионов  ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$  и  ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$  вследствие перезарядки в камере циклотрона ЦИТРЕК [1], ускоряющего ионы до энергии 2,4 МэВ/нуклон, и пучков  $\text{H}_2^+$ ,  ${}^{12}\text{C}^{6+}$ , ускоряемых в камере циклотрона C400 [2] (ИВА, Бельгия) до 260 МэВ и 400 МэВ/нуклон соответственно.

## МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Эффективность прохождения пучка тяжелых и легких ионов оценивалась в программе IONLOSS в процессе расчетов динамики пучка в ранее созданном комплексе программ DYN в интегрированном математическом пакете MATLAB.

Моделирование динамики частиц в программе DYN осуществляется в магнитном поле, полученном либо в результате компьютерного моделирования, либо в результате магнитных измерений циклотрона. Ускоряющее электрическое поле либо аппроксимируется аналитическими формулами [3], либо используется в виде карты поля, полученной при расчете ВЧ-резонатора [4].

## РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ПУЧКА

Эффективность прохождения  $T_{\text{эфф}}$  пучком ионов участка пути длиной  $L$  равна

$$T_{\text{эфф}}(L) = I(L)/I_0. \quad (1)$$

Полагаем, что изменение интенсивности происходит только в результате перезарядки ионов. Процессы захвата и потери электронов вносят максимальный вклад при расчете потерь интенсивности пучка ионов при взаимодействии с молекулами остаточного газа. Итак, эффективность прохождения пучка определяется следующим образом:

$$T_{\text{эфф}} = \exp(-\sigma nL), \quad (2)$$

где  $\sigma$  — сечение перезарядки иона на остаточном газе;  $n$  — концентрация молекул остаточного газа;  $L$  — длина траектории. Выражение (2) преобразуется к виду [5]

$$T_{\text{эфф}} = e^{-3,3 \cdot 10^{16} \int_0^L P \sigma(\beta(l)) dl}, \quad (3)$$

где  $dl$  — элемент длины пути иона [в см];  $P$  — давление остаточного газа [в торр];  $\beta$  — относительная скорость иона;  $\sigma(\beta(l))$  — сечение перезарядки иона на остаточном газе [в  $\text{см}^{-2}$ ] при температуре остаточного газа  $T = 293$  К.

Таким образом, 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. Уменьшение ускоряющего напряжения приводит к увеличению длины пути ионов в циклотроне и, как следствие, к увеличению потерь при перезарядке на остаточном газе. На эффективность работы ускорителя ионов оказывает существенное влияние уровень вакуума в камере циклотрона. Так как в рассмотренных циклотронах применяется внешняя инжекция, то давление в камере можно приближенно считать постоянным, не зависящим от радиуса.

Полное сечение перезарядки иона на остаточном газе зависит от атомного номера и заряда ускоряемого иона, типа остаточного газа, энергии ускоряемых частиц. Полное сечение можно считать равным сумме двух сечений: сечения захвата одного электрона и сечения потери одного электрона. В программе IONLOSS осуществлялось интегрирование формулы (3) для расчета эффективности прохождения пучка ионов, при этом расчет сечений взаимодействия с остаточным газом производился различно для тяжелых и легких ионов.

## РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ПУЧКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

Как и в работах [6] и [7], расчеты сечений перезарядки для тяжелых ионов проводились по полуэмпирическим формулам для различных диапазонов энергий.

Для энергий  $E \leq 0,006$  МэВ/нуклон сечение перезарядки вычислялось по известной эмпирической формуле работы [8]

$$\sigma_{z,z-1} = 1,43 \cdot 10^{-12} z^{1,17} I_0^{-2,76},$$

$z$  — заряд иона;  $I_0$  [эВ] — первый потенциал ионизации остаточного газа;  $\sigma_{z,z-1}$  [см<sup>-2</sup>] — сечение захвата. При этом полное сечение  $\sigma_0 = \sigma_{z,z-1}$  (сечением потери электрона пренебрегаем, так как сечение захвата при таких энергиях много больше сечения потери).

Далее до энергии 0,5 МэВ/нуклон сечение перезарядки вычислялось согласно [9]:

$$\sigma(E) = \sigma_0 e^{-\gamma E},$$

где  $\gamma$  — константа, зависящая от  $\sigma_0$  и  $\sigma_k$  ( $\sigma_k$  — сечение при  $E = 0,5$  МэВ).

Для диапазона энергий 0,5–1,4 МэВ/нуклон применялись формулы работы [10]:

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

где  $\bar{z} = A\{1 - \exp(-137\beta\delta)\}$ ,  $\beta$  — относительная скорость,  $\delta = 0,3443 - 0,0667 \ln(A)$ ,  $A$  — атомный номер ускоряемых ионов.

Итак, полное сечение

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

Для сравнения приведем эмпирическую зависимость тех же авторов [10]:

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

$E$  [МэВ/нуклон] — энергия ионов.

Оба варианта показали аналогичный результат.

При энергиях больше 1,4 МэВ/нуклон использовались формулы работы [11]

$$\begin{aligned} \sigma_{z,z+1} &= 9 \cdot 10^{-19} z^{-\frac{2}{5}} \beta^{-2}, \\ \sigma_{z,z-1} &= 3 \cdot 10^{-28} z^{\frac{5}{2}} \beta^{-7}, \\ \sigma &= \sigma_{z,z-1} + \sigma_{z,z+1}. \end{aligned}$$

При расчетах потерь пучков тяжелых ионов  ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$  и  ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$  в циклотроне ЦИТРЕК полагалось, что остаточный газ в камере — азот.

Циклотрон ЦИТРЕК представляет собой изохронный циклотрон с азимутальной вариацией магнитного поля (четырёхсекторная структура), аксиальной инъекцией ионов, высокочастотной ускоряющей системой и электростатической системой вывода. ЦИТРЕК предназначен для облучения полимерных пленок, используемых в производстве разделяющих и фильтрующих элементов медицинского, промышленного и бытового назначения.

Пусконаладочные работы циклотрона осуществлялись в условиях, существенно отличных от проектных [12]. Во-первых, вместо ионов криптона ускоряли ионы аргона; во-вторых, амплитуда ускоряющего напряжения равнялась 40 кВ (согласно проекту напряжение на резонаторе планировалось 50 кВ). В связи с этими изменениями коэффициенты прохождения пучков ионов  ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$  и  ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$  в камере циклотрона были рассчитаны для различных значений ускоряющего напряжения и давлений остаточного газа. На рис. 1 показана зависимость коэффициента прохождения  $T$  ионов  ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$  от давления в камере ускорителя для трех значений ускоряющего напряжения: 40, 50, 60 кВ [13]. Видно, что при давлении в камере циклотрона  $10^{-6}$  торр коэффициент прохождения равен 68 % для  $V = 60$  кВ, 63 % для  $V = 50$  кВ и 56 % для  $V = 40$  кВ. Очевидно, что уменьшение ускоряющего напряжения приводит к увеличению потерь, что связано с удлинением траектории из-за роста числа оборотов.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициентов прохождения ионов аргона и криптона от давления в камере циклотрона при амплитуде ускоряющего напряжения 40 кВ.

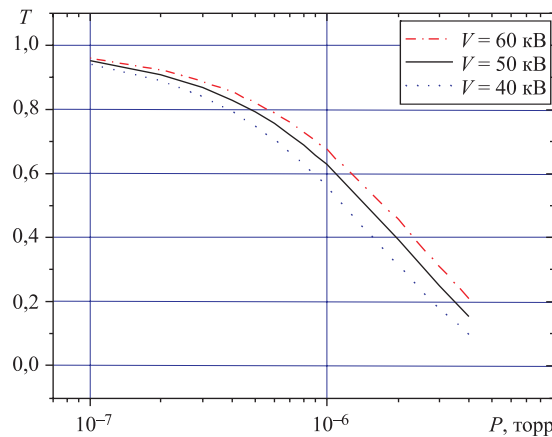


Рис. 1. Зависимость коэффициента прохождения ионов  ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$  от давления в камере ускорителя для различных ускоряющих напряжений

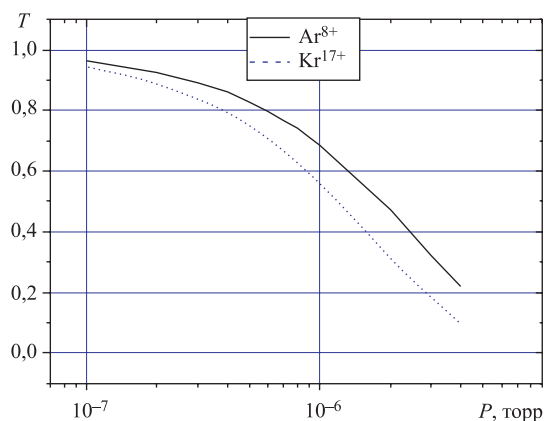


Рис. 2. Зависимость коэффициентов прохождения ионов  ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$  и  ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$  от среднего давления в камере циклотрона для ускоряющего напряжения 40 кВ

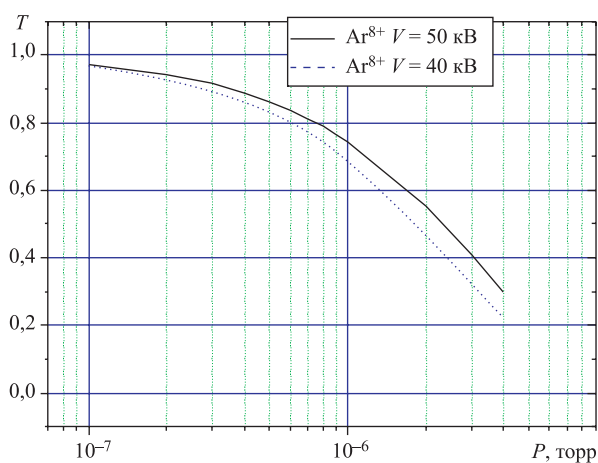


Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения ионов  ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$  от среднего давления в камере циклотрона для ускоряющих напряжений 40 и 50 кВ

Коэффициент прохождения ионов  ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$  более 60% достигается при следующих условиях: давление в камере не превышает  $2 \cdot 10^{-6}$  торр для проектного ускоряющего напряжения 50 кВ и  $1,5 \cdot 10^{-6}$  торр для  $V = 40$  кВ (см. рис. 3).

Первоначально было осуществлено ускорение небанчиванного пучка ионов аргона в циклотроне при средней величине давления около  $10^{-6}$  торр. На рис. 4 представлена зависимость интенсивности пучка от радиуса, полу-

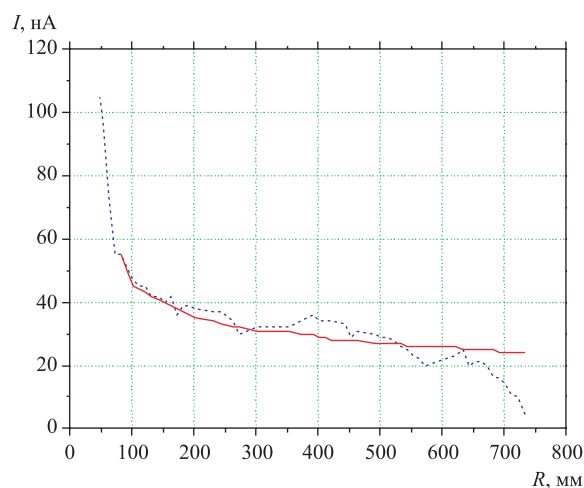


Рис. 4. Экспериментальная зависимость интенсивности пучка  ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$  от радиуса, полученная при помощи радиального пробника (штриховая линия); сплошная линия — расчетные данные

ченая при помощи радиального пробника, расположенного в середине холма магнита. Видно, что в центре циклотрона наблюдаются существенные потери пучка, связанные с отбором частиц по фазам (частицы с фазовым разбросом за пределами  $\pm 30^\circ$  теряются на кромках дуантов), а далее экспериментальная кривая (штриховая линия) хорошо соответствует расчетной зависимости интенсивности от радиуса (сплошная линия) при величине среднего давления в камере циклотрона  $10^{-6}$  торр.

### РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ПУЧКА ЛЕГКИХ ИОНОВ

Для расчета эффективности прохождения легких ионов также не хватает экспериментальных данных по сечениям взаимодействия с молекулами остаточного газа для всего диапазона энергий ускоряемых ионов. Поэтому необходимо использовать полуэмпирические формулы для расчетов сечений взаимодействия, но отличные от тех, которые мы использовали при расчете потерь тяжелых ионов.

Нам было необходимо провести расчеты потерь для оптимизации вакуумной системы циклотрона С400 [2], предназначенного для адронной терапии онкологических заболеваний ионами углерода и протонами (в циклотроне ускоряются ионы молекулярного водорода  $\text{H}_2^+$ , которые после вывода перезарядкой на фольге распадаются на 2 протона и электрон). Так же, как и



ранее, мы не можем использовать единую формулу, универсальную для всего диапазона энергий. Фирма ИВА проводила анализ остаточного газа в своих циклотронах и пришла к выводу, что его основу на 70 % составляют пары воды [14]. Таким образом, мы вправе использовать экспериментальные данные по сечениям взаимодействия с водяным паром или с азотом, так как в первом случае мы имеем дело с наиболее вероятным компонентом остаточного газа, а во втором случае получаем максимальные потери, поскольку сечение взаимодействия с азотом каких бы то ни было налетающих ионов всегда больше, чем сечение взаимодействия с парами воды.

При расчете потерь ионов при прохождении по линии инжекции (энергия ионов 12,5 кэВ/нуклон) мы использовали экспериментальные значения сечений взаимодействия. Известно, что сечение перезарядки практически не меняется и достигает своего максимального значения в диапазоне энергий налетающего иона от 1 до 10 кэВ/нуклон [15]. Поэтому для наших оценок мы можем использовать величины сечений захвата ионами углерода:  $\sigma_{q,q-1} = (6,0 \pm 1,4)10^{-15} \text{ см}^2$  (один электрон) и  $\sigma_{q,q-2} = (0,8 \pm 0,7)10^{-15} \text{ см}^2$  (захват двух электронов), полученные при энергии налетающего иона 3,75 кэВ/нуклон в работе [16]. Эта величина (суммарно  $6,8 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ ) будет даже несколько выше, так как энергия инжекции немного больше, чем вышеуказанный диапазон (от 1 до 10 кэВ/нуклон).

Экспериментальные значения сечения перезарядки  $\text{H}_2^+$ -ионов с молекулами водяного пара при энергии 12,5 кэВ/нуклон составляют  $1-2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$  [17]. Таким образом, при прохождении по линии инжекции потери ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$  будут существенно больше, чем потери  $\text{H}_2^+$ -ионов. При этом, как показывают расчеты, потери пучков при прохождении по линии ин-

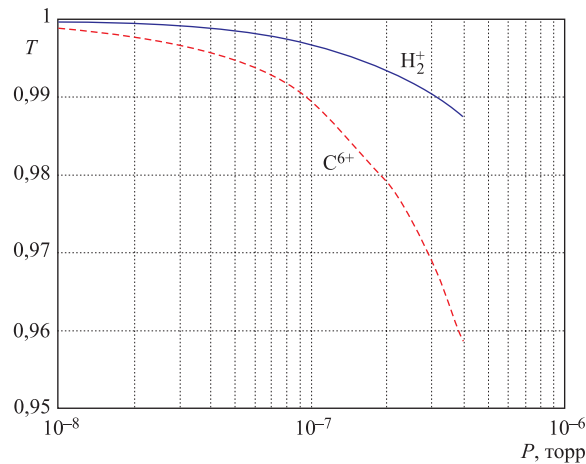


Рис. 5. Зависимость коэффициента прохождения от давления в линии инжекции

жекции длиной 5 м не превысят 2 % при условии, что давление остаточного газа будет не больше  $2 \cdot 10^{-7}$  торр (см. рис. 5).

С ростом энергии ситуация с потерями ионов углерода и молекулярного водорода меняется, т. е. большим становится сечение взаимодействия ионов молекулярного водорода, чем ионов углерода. Поэтому в процессе ускорения в камере циклотрона существенными становятся потери ионов молекулярного водорода.

В расчетах мы использовали экспериментальные сечения взаимодействия молекулярного водорода с остаточным газом вплоть до энергии  $E = 100$  кэВ. При больших энергиях имеются экспериментальные данные по сечениям взаимодействия только для отдельных значений энергии, поэтому для оценки сечения при  $E \geq 100$  кэВ была использована формула Бора [5]

$$\sigma(E) = \pi a_0^2 Z_t^{2/3} \frac{v_0}{v} \sqrt{\frac{I_0}{I}} \quad \text{для } Z_t > 3 \quad (\text{средняя мишень}), \quad (4)$$

где  $v_0 = 2,19 \cdot 10^8$  см/с и  $a_0 = 5,29 \cdot 10^{-9}$  см — это скорость и радиус Бора соответственно;  $Z_t$  — атомное число остаточного газа;  $v$  — скорость ионов  $\text{H}_2^+$ ;  $I$  — энергия связи электрона;  $I_0 = 13,6$  эВ.

На рис. 6 представлена зависимость сечения процесса потери электрона ионом  $\text{H}_2^+$  от энергии иона  $\text{H}_2^+$  [18–20]. Можно заключить, что формула Бора (4) дает заниженное на 5–15 % значение сечения процесса потери электрона по сравнению с экспериментальными значениями. Однако среди существующих математических моделей она дает наилучшее приближение к эксперименту, поэтому была использована при расчетах.

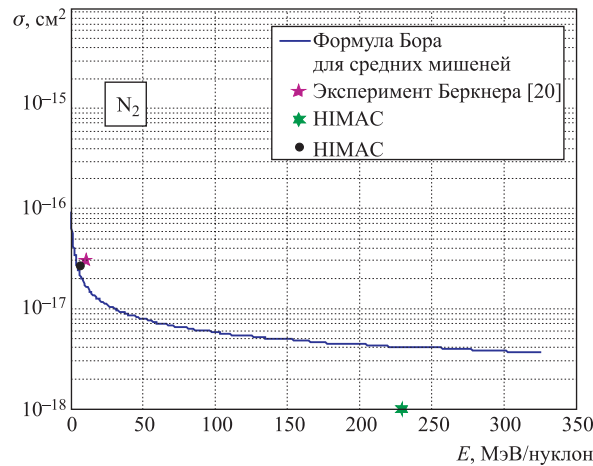


Рис. 6. Зависимость сечения процесса потери электрона (формула Бора для средних мишеней) от энергии налетающего иона  $\text{H}_2^+$

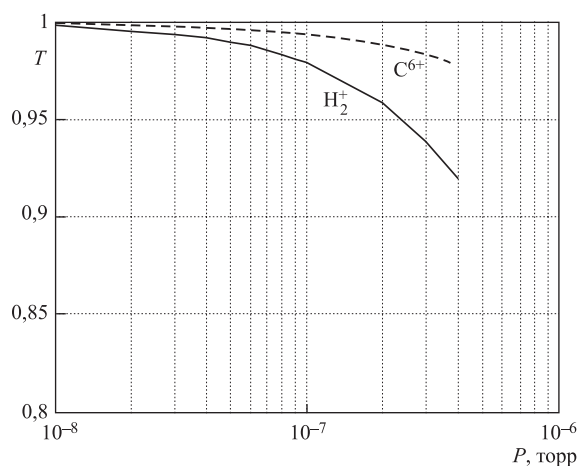


Рис. 7. Зависимость коэффициентов прохождения пучков  $\text{H}_2^+$ - и  $^{12}\text{C}^{6+}$ -ионов от давления в камере циклотрона С400. Остаточный газ — азот

При расчете потерь ионов углерода применяли экспериментальные значения сечения захвата одного электрона из работы [21] вплоть до энергии  $E = 1,3 \cdot 10^6$  эВ/нуклон, при больших энергиях величина сечения уменьшается, но мы предполагали ее равной сечению при энергии  $E = 1,3 \cdot 10^6$  эВ/нуклон, а именно  $7,67 \cdot 10^{-20}$  см<sup>2</sup>.

Потери ионов  $\text{H}_2^+$  в камере циклотрона намного превосходят потери ионов  $^{12}\text{C}^{6+}$  в связи с разницей в величине сечения потери и захвата электрона соответственно. На рис. 7 представлена зависимость коэффициентов прохождения пучков ионов  $\text{H}_2^+$  и  $^{12}\text{C}^{6+}$  от давления в камере циклотрона С400. Видно, что потери интенсивности пучка  $\text{H}_2^+$ -ионов для давления  $2 \cdot 10^{-7}$  торр не превысят 5 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чтобы расширить возможности комплекса программ DYN, была разработана программа IONLOSS, позволяющая рассчитывать потери пучков ионов при перезарядке на молекулах остаточного газа в процессе движения пучка.

Модуль программы, предназначенный для расчета потерь тяжелых ионов при перезарядке при взаимодействии с молекулами остаточного газа, применялся для расчета коэффициента прохождения в ускорителе ЦИТРЕК. Полученные расчетные данные хорошо соответствуют экспериментальным.

Программа для расчета потерь легких ионов в процессе перезарядки применялась для вычисления коэффициента прохождения в сверхпроводящем

ускорителе С400 (ИВА, Бельгия). Расчеты показали, что требования к уровню вакуума определяются ионами  $^{12}\text{C}^{6+}$  в линии инжекции и  $\text{H}_2^+$  в камере циклотрона. Для давления  $2 \cdot 10^{-7}$  торр расчетные потери интенсивности пучка  $^{12}\text{C}^{6+}$ -ионов в линии инжекции составляют около 2 %, потери интенсивности пучка  $\text{H}_2^+$  в камере циклотрона составляют около 5 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аленцкий Ю. Г. и др. Разработка и создание облучательного комплекса «Альфа» для производства трековых мембран // Атомная энергия. 2004. Т. 97, вып. 1. С. 33–40.
2. Jongen Y. et al. Compact Superconducting Cyclotron C400 for Hadron Therapy // NIM A. 2010. V. 624, Issue 1. P. 47–53.
3. Hazewindus N. et al. The magnetic Analogue Method as Used in the Study of a Cyclotron Central Region // NIM. 1974. V. 118. P. 125.
4. Alenitsky Y. et al. Dubna, Project of Cyclotron C250 for Proton Therapy Application // Proc. of RuPAC XXII, 2010. P. 371.
5. Betz H. D. // Rev. Mod. Phys. 1972. V. 44, No. 3. P. 465.
6. Tikhomirov A. et al. Computer Modeling of the Beam Transmission Efficiency Dependent on the Charge Exchange with the Residual Gas for the CI-100 Cyclotron // Proc. of the 6th Int. Computational Accelerator Physics Conf. ICAP, Darmstadt, Germany, 2000.
7. El-Shazly M. N. et al. Beam Loss Due to the Charge Exchange with the Residual Gas in the FLNR Heavy Ion Cyclotrons // Proc. VI EPAC, 1998. P. 2199.
8. Muller A., Salzborn E. Scaling of Cross-Sections for Multiple Electron Transfer to Highly Charged Ions Colliding with Atom and Molecules // Phys. Lett. A. 1977. V. 62. P. 391.
9. Gough R. A., Mallory M. L. Charge Exchange Losses During Cyclotron Acceleration: Experiment and Theory // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1979. V. NS-26, No. 2.
10. Baron E. et al. Charge Exchange of Very Heavy Ions in Carbon Foils and in the Residual Gas of GANIL Cyclotrons // NIM A. 1993. V. 328. P. 177–182.
11. Hseuh H. C. et al. Ultrahigh Vacuum System of the Heavy Ion Transport Line at Brookhaven // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1985. V. NS-3, No. 5. P. 177.
12. Денисов Ю. Н. и др. Физический пуск циклотрона ЦИТРЕК // Part. Nucl., Lett. 2005. V. 2, No. [3]-2005. P. 34–38.
13. Калининко В. В., Карамышева Г. А. Оценка потерь ионов вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2002-58. Дубна, 2002.

14. *Nuttens V. et al.* Cyclotron Vacuum Model and  $H^-$  Gas Stripping Losses // Proc. of Cyclotrons, Lanzhou, China, 2010.
15. *Shirkov G., Zschornack G.* Electron Impact Ion Sources for Highly Charged Ions. Vieweg and sohn Verlagsgesellschaft, 1996. P. 9.
16. *Greenwood J. B. et al.* Experimental Investigation of the Processes Determining X-Ray Emission Intensities from Charge Exchange Collisions // Phys. Rev. A. 2001. V. 63. P. 062707.
17. *Dagnac R. et al.* A Study on the Collision of Hydrogen Ions  $H_1^+$ ,  $H_2^+$  and  $H_3^+$  with a Water-Vapour Target // J. Phys. B: Mol. Phys. 1970. V. 3.
18. *Williams J. F.* // Phys. Rev. 1966. V. 149, No. 1. P. 148.
19. NIFS DATABASE (National Institute for Fusion Science). <http://dbshino.nifs.ac.jp/>
20. *Berkner K.* Collisional Breakup of High-Energy  $H^{2+}$  Ions // Phys. Rev. 1966. V. 146, No. 1.
21. *Janev R. K. et al.* // Atomic Data and Nuclear Tables. 1988. V. 40, No. 2.

Получено 7 апреля 2011 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 01.06.2011.

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

Усл. печ. л. 0,87. Уч.-изд. л. 1,02. Тираж 230 экз. Заказ № 57340.

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

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)