

Электронные и ионные пучки

УДК 621.3.038.625

Потери ионов вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона

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

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.

PACS: 20.29 db

Ключевые слова: циклотрон, пучок ионов, остаточный газ, перезарядка, ускоритель, программа.

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. Как правило, исходя из этих потерь, выдвигаются требования к вакууму 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. Расчет потерь производится на основании как экспериментальных значений сечений взаимодействия ионов с молекулами остаточного газа, так и по известным эмпирическим формулам, обоснованность применения которых была проверена экспериментально на циклотроне ЦИТРЕК [1].

В качестве примеров приведены результаты расчетов потерь пучка ионов аргона $^{40}\text{Ar}^{8+}$ и криптона $^{84}\text{Kr}^{17+}$ на перезарядку в камере циклотрона ЦИТРЕК, ускоряющего ионы до энергии 2,4 МэВ/нуклон, и пучков H_2^+ , C_{12}^{6+} , ускоряемых

в камере циклотрона С400 [2] (IBA, Бельгия) до 260 МэВ и 400 МэВ/нуклон, соответственно. Полученные результаты используются при проектировании вакуумной системы уникального сверхпроводящего циклотрона С400, работы по созданию которого начались осенью 2010 г., а запуск планируется осуществить не позднее 2017 г. в рамках проекта Archade в медицинском центре г. Канн, Франция.

Методика расчетов

Эффективность прохождения пучка тяжелых и легких ионов оценивалась в подпрограмме 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 в результате либо компьютерного моделирования, либо 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_{eff} пучком ионов участка пути длиной L равна

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

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. Таким образом, эффективность прохождения пучка определяется следующим образом:

Карамышев Олег Владимирович, младший научный сотрудник.
Карамышева Галина Анатольевна, начальник научного отдела.
Скрипка Галина Михайловна, инженер.

Объединенный институт ядерных исследований.
Россия, 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6.

Тел. (09621) 62-357. E-mail: gkaram@nusun.jinr.ru

Статья поступила в редакцию 20 мая 2011 г.

© Карамышев О. В., Карамышева Г. А., Скрипка Г. М., 2011

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

где σ — сечение перезарядки иона на остаточном газе;

n — концентрация молекул остаточного газа;

L — длина траектории.

Выражение (2) преобразуется к виду [5]:

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

где dl — элемент длины пути иона в см;

P — давление остаточного газа в Торр;

β — относительная скорость иона;

$\sigma(\beta(l))$ — сечение перезарядки иона на остаточном газе в $\text{см}^2/\text{молекула}$, все 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 на перезарядку на остаточном газе. На эффективность работы ускорителя ионов оказывает существенное влияние уровень вакуума в камере циклотрона. Так как в рассмотренных циклотронах применяется внешняя инжекция ионов, то давление в камере можно приближенно считать постоянным, т. е. 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, а именно, сечения захвата одного электрона и сечения потери одного электрона. В программе IONLOSS осуществляется интегрирование формулы (3) для расчета эффективности прохождения пучка ионов, при этом расчет сечений взаимодействия с остаточным газом осуществлялся различно для тяжелых и легких ионов.

Расчет потерь пучка тяжелых ионов

Как и в работах [6, 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]:

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

где z — заряд иона, I_0 [эВ] — первый потенциал ионизации остаточного газа; $\sigma_{z,z-1}$ [$\text{см}^2/\text{молекула}$] — 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 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/нуклон применялись формулы работы [10]:

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

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

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

Окончательно имеем

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

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

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

где E [МэВ] — энергия ионов.

Оба варианта показали аналогичный результат.

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

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

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

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

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

Циклотрон ЦИТРЕК представляет собой изохронный циклотрон с азимутальной вариацией магнитного поля (четырёхсекторная структура), аксиальной инжекцией 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 отличающихся от проектных [12]. Во-первых, вместо ионов криптона ускоряли ионы аргона, во-вторых, амплитуда ускоряющего напряжения V равнялась 40 кВ (со-

гласно проекту напряжение на резонаторе планировалось 50 кВ). В связи с этими изменениями коэффициенты прохождения пучка 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 ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$ 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.

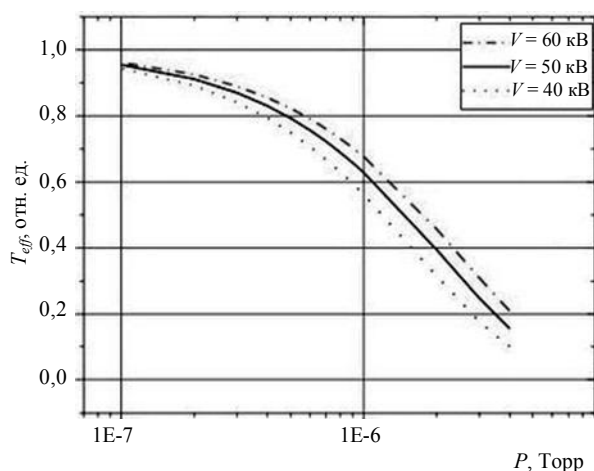


Рис. 1. Зависимость коэффициента прохождения ионов ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$ от давления в камере ускорителя для различных ускоряющих напряжений

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

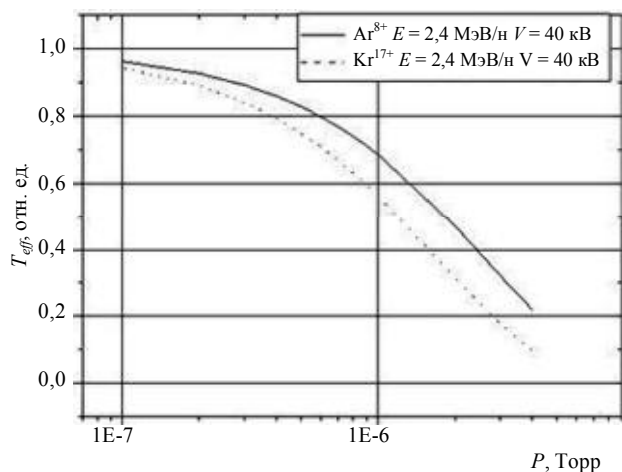


Рис. 2. Зависимость коэффициента прохождения ионов ${}_{84}\text{Kr}^{17+}$ и ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$ от среднего давления в камере ускорителя для ускоряющего напряжения 40 кВ

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 (рис. 3).

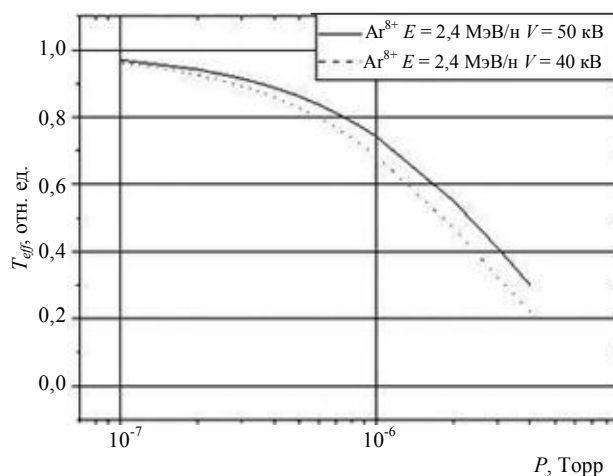


Рис. 3. Зависимость коэффициента прохождения ионов ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$ от среднего давления в камере ускорителя для ускоряющих напряжений: 40 и 50 кВ

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

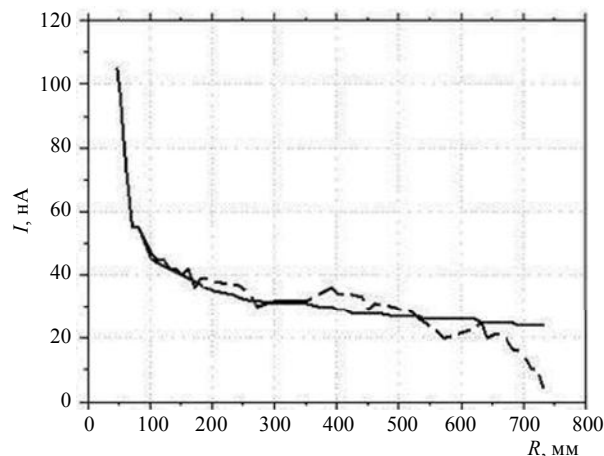


Рис. 4. ----- — экспериментальная зависимость интенсивности пучка ${}_{40}\text{Ar}^{8+}$ от радиуса, полученная при помощи радиального пробника, ————— — расчетные данные

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 сечения взаимодействия, но отличные от тех, которые использовались при расчете потерь тяжелых ионов.

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 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 в 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: $\sigma_{q,q-1} = (6,0 \pm 1,4) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ (один электрон) и $\sigma_{q,q-2} = (0,8 \pm 0,7) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ (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 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, в линии инжекции потери ионов C^{6+} будут существенно больше, чем потери H_2^+ ионов. При этом, как показывают расчеты, потери в линии инжекции длиной 5 м не превысят 2 %

при условии, что давление остаточного газа в линии не будет превышать $2 \cdot 10^{-7}$ Торр (рис. 5).

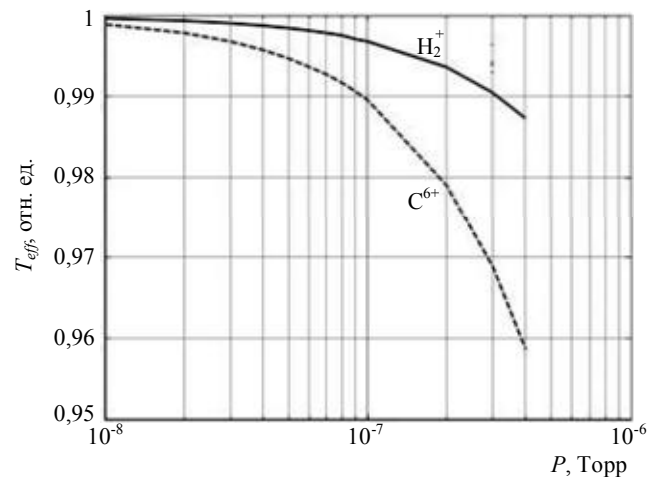


Рис. 5. Зависимость коэффициента прохождения от давления в линии инжекции

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] для $Z_i > 3$ (средняя мишень):

$$\sigma(E) = \pi a_0^2 Z_T^{2/3} \frac{v_0}{v} \sqrt{\frac{I_0}{I}}, \quad (4)$$

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_i и Z_t — атомные числа налетающего H_2^+ иона и остаточного газа, соответственно;

v — скорость ионов H_2^+ ;

I — энергия связи электрона, $I_0 = 13,6$ эВ.

На рис. 6 представлена зависимость сечения процесса потери электрона ионом H_2^+ от энергии иона 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 и поэтому была использована при расчетах.

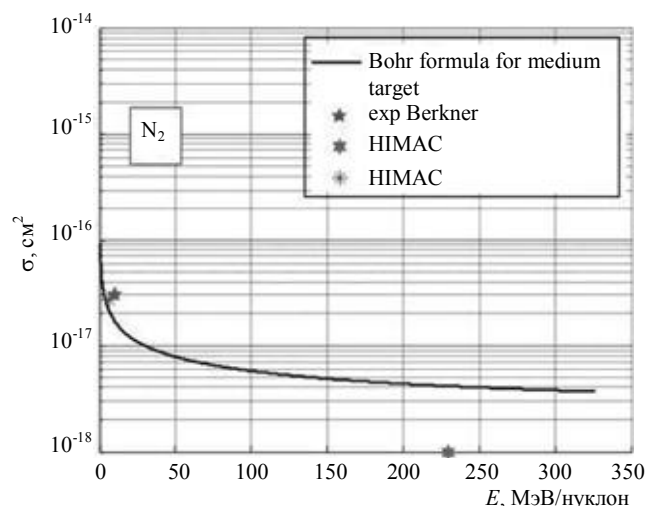


Рис. 6. Зависимость сечения процесса потери электрона (формула Бора для средних мишеней) от энергии налетающего иона H_2^+

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 авторы по-прежнему предполагали ее равной сечению при энергии $E = 1,3 \cdot 10^6$ эВ/нуклон, а именно, $7,67 \cdot 10^{-20}$ см².

Потери ионов H_2^+ в камере циклотрона намного превосходят потери C^{6+} в связи с разницей в величине сечения потери и захвата электрона, соответственно.

На рис. 7 представлена зависимость коэффициента прохождения пучка ионов H_2^+ и C^{6+} от давления в камере циклотрона С400. Из этой зависимости видно, что потери интенсивности пучка H_2^+ ионов для давления $2 \cdot 10^{-7}$ Торр не превысят 5 %.

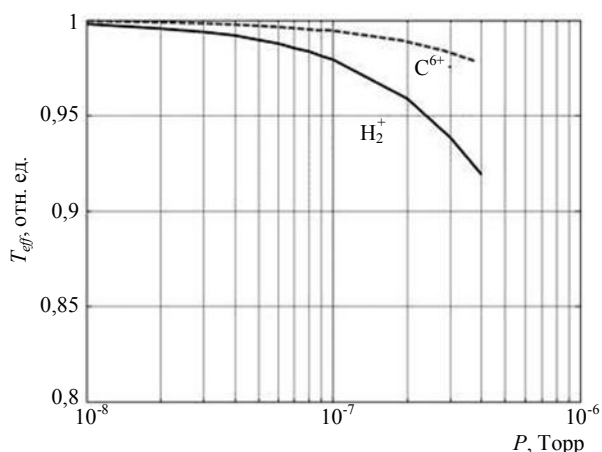


Рис. 7. Зависимость коэффициента прохождения пучка H_2^+ и C^{6+} ионов от давления в камере циклотрона С400. Остаточный газ — азот

Заключение

Расширяя возможности комплекса программ DYN, в данной работе была разработана програм-

ма IONLOSS, позволяющая рассчитывать потери пучков ионов при перезарядке на молекулах остаточного газа в процессе движения пучка.

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

Программа для расчета потерь легких ионов на перезарядку применялась для расчета коэффициента прохождения в сверхпроводящем ускорителе С400 (ИВА, Бельгия).

Расчеты показали, что требования к уровню вакуума определяются ионами C^{6+} в линии инжекции и H_2^+ в камере циклотрона. Для давления $2 \cdot 10^{-7}$ Торр расчетные потери интенсивности пучка C^{6+} ионов в линии инжекции составляют около 2 %, потери интенсивности пучка H_2^+ в камере циклотрона составляют около 5 %.

Литература

1. Аленцкий Ю. Г. и др. // Атомная энергия. 2004. Т. 97. Вып. 1. С. 33.
2. Jongen Y. et al. // NIM. A 624. 2010. Issue 1. P. 47.
3. Hazewindus N. et al. // NIM. 1974. No. 118. P. 125.
4. Alenitsky Y. et al. Project of Cyclotron C250 for Proton Therapy Application // Proceedings of RuPAC 2010. V.XXII. P. 371.
5. Betz // Rev. of 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. 6th International Computational Accelerator Physics Conference (ICAP). 2000. Darmstadt, Germany.
7. El-Shazly M. N., Gulbekian G. G. 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. // Phys. Lett. 1977. No. 62A. P. 391.
9. Gough R. A., Mallory M. L. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1979. V. NS-26. No. 2. P. 34.
10. Baron E. et al. // NIM 1993. V. A328 P. 177.
11. Hseuh H. C. et al. // IEEE Trans. Nuc. Sci. 1985. V. NS-32. No. 5. P. 177.
12. Денисов Ю. Н. и др. // Physics of Particles and Nuclei, Lett. 2005. V. 2. No. 3. P. 34.
13. Калиниченко В. В., Карамышева Г. А. Оценка потерь ионов вследствие перезарядки на остаточном газе в камере циклотрона // Сообщения ОИЯИ Р9-2002-58. Дубна. 2002.
14. Nuttens V. et al. Cyclotron vacuum model and H-gas stripping losses // Proc. of cyclotrons. 2010. Lanzhou. China.
15. Shirkov G., Zschornack G. Electron Impact ion sources for Highly Charged ions (Vieweg and sohn Verlagsgesellschaft.), 1996.
16. Greenwood J. B. et al. // Physical Review A. 2001. V. 63. P. 234.

17. *Dagnac R. et al.* // J. Phys. B: Molec. Phys. 1970. V. 3. P. 413.
18. *Williams J.F.* // Physical Review. 1966. V. 149. No. 1. P. 148.

19. NIFS DATABASE (National Institute for Fusion Science), <http://dbshino.nifs.ac.jp/>
20. *Berkner K.* // Physical Review. 1966. V. 146. No. 1. P. 56.

Beam losses due to the charge exchange with the residual gas in the cyclotron

O. V. Karamyshev, G. A. Karamysheva, G. M. Skripka
Joint Institute for Nuclear Research,
6 Joliot-Curie str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia
E-mail: gkaram@nu.jinr.ru

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 to simulate beam losses due to charge exchange with the residual gas while moving in the vacuum chamber.

PACS: 20.29 db

Keywords: cyclotron, ion beam, residual gas, charge exchange, accelerator, program.

Bibliography — 20 references.

Received May 20, 2011