

ВЛИЯНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ НА ВАКУУМНЫЕ УСЛОВИЯ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

*И. Н. Мешков, А. В. Филиппов*¹

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Одним из процессов, приводящих к ухудшению вакуумных условий при работе с пучком ядер золота в коллайдере проекта NICA, может быть эффект электронных облаков. В работе исследовано влияние плотности электронного облака на когерентный сдвиг частоты бетатронных колебаний частиц в коллайдере при разных интенсивностях пучка ядер золота, их энергиях и коэффициенте вторичной эмиссии с поверхности вакуумной камеры. Даны оценки прироста давления остаточного газа в вакуумной камере коллайдера вследствие дополнительной вакуумной нагрузки и теплопритока, обусловленных электронными облаками.

One of the processes leading to the vacuum conditions degradation when working with a gold bare nuclei beam in the NICA collider can be the electron clouds effect. Influence of e-cloud densities on the coherent tune shift of ion betatron oscillation in the collider ring was investigated for different bare gold nuclei beam intensity, its energies and electron secondary emission yields from the collider vacuum chamber. The pressure rise due to additional gas load and heat load caused by electron clouds is estimated.

PACS: 29.20.dk; 29.27.Bd

ВВЕДЕНИЕ

Основным источником образования свободных электронов в вакуумной камере ускорителя является процесс ионизации молекул и атомов остаточного газа пучком заряженных частиц. Эти «первичные» электроны могут быть захвачены и в дальнейшем ускорены электрическим полем сгустка частиц пучка до энергии от нескольких десятков до нескольких сотен электронвольт. Электроны, падающие с такой энергией на стенку вакуумной камеры, могут выбивать с ее поверхности «вторичные» электроны, энергия которых может достигать величины нескольких десятков элетронвольт либо упруго отражаться от нее, либо адсорбироваться на ее поверхности, не производя десорбции с нее. С другой стороны, некоторая их часть, «выжившая» при соударении, может быть ускорена следующим сгустком частиц пучка и также попасть на стенку вакуумной камеры, производя новые «вторичные» электроны. В результате может возникнуть лавинообразное размножение, приводящее к образованию электронных облаков (ЭО) на траектории пучка (рис. 1).

¹E-mail: philippov@jinr.ru

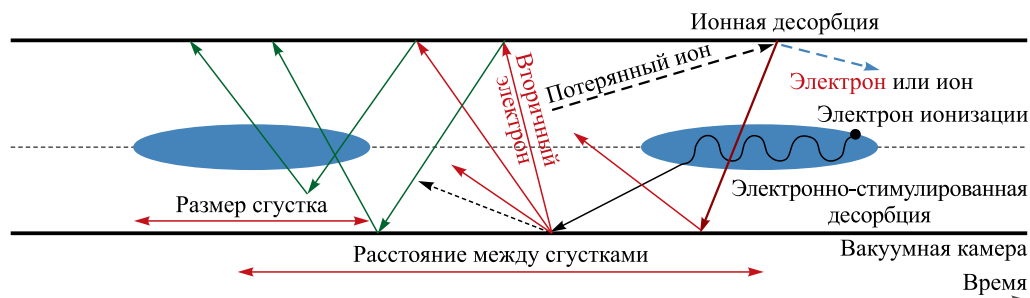


Рис. 1. Схема образования ЭО в циклических ускорителях ионов

Необходимое условие [1], характеризующее время прохождения электронов от стенки к стенке вакуумной камеры, которое должно быть не больше времени между прохождением в этом месте двух последовательных сгустков пучка, имеет вид

$$N_b > \frac{\beta^2 R^2}{Z r_e S_b}, \quad S_b = \frac{C}{n_b}. \quad (1)$$

Здесь N_b — число заряженных частиц в сгустке; βc — скорость сгустка; R — радиус вакуумной камеры (для камеры эллиптического сечения эта величина соответствует длине малой полуоси); Z — заряд ионов пучка; r_e — классический радиус электрона; S_b — расстояние между сгустками частиц в пучке; C — периметр ускорителя; n_b — число сгустков.

Достаточное условие [1] определяется энергией электронов ΔE , приобретенной ими в электрическом поле сгустка, достаточной для выбивания по крайней мере одного электрона с поверхности вакуумной камеры:

$$N_b > \frac{\beta R}{Z r_e} \sqrt{\frac{\Delta E}{2 m_e c^2}}. \quad (2)$$

Здесь m_e — масса электрона.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для коллайдера проекта NICA [2] первые оценки влияния эффекта ЭО на его работу были сделаны в 2008–2011 гг. в работе [3]. В работе [4] приведены требования к свойствам вакуумной камеры, необходимым для «безоблачной» работы коллайдера. Однако к моменту выхода концептуального проекта комплекса NICA в 2015 г. параметры коллайдера претерпели сильные изменения. Кроме того, его запуск и наладка планируются в так называемой базовой конфигурации [5]. Параметры базовой и проектной конфигураций коллайдера отличаются (см. таблицу).

Необходимое (1) и достаточное (2) условия возникновения развития ЭО для различных фокусирующих элементов приведены на рис. 2.

На рис. 2 (кривая 4) приведена зависимость интенсивности ядер золота в сгустке от энергии для базовой версии коллайдера. Видно, что область значений интенсивностей

Параметры коллайдера проекта NICA [2], использованные при проведении расчетов

Параметр	Базовая версия	Проектная версия
Ион	$^{197}\text{Au}^{79+}$	
Энергия, ГэВ/нуклон	1–4,5	
Число частиц в сгустке	$1 \cdot 10^8 - 7 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8 - 3 \cdot 10^9$
Число сгустков	21	
Периметр, м	503,04	
Среднеквадратичный эмиттанс x/y , π мм · мрад	1,1/0,5–1	1,1/1–0,7
Среднеквадратичная длина сгустка, м	1,2	0,6
Поле диполя/градиент поля в линзе, Тл/Тл/м	1,8/23,1	
Длина диполя/линзы/свободного промежутка, м	1,94/0,47/15	
Апертура в диполе/линзе/свободном промежутке, м	$0,06 \times 0,035/0,06 \times 0,035/0,05 \times 0,05$	
Полное сечение ионизации остаточного газа, см^2	$1,3 \cdot 10^{-18}$	
Полное давление остаточного газа, нТорр	0,01	
Средняя температура в «теплой»/«холодной» камере, К	300/10	
Коэффициент вторичной эмиссии	1,1–1,9	

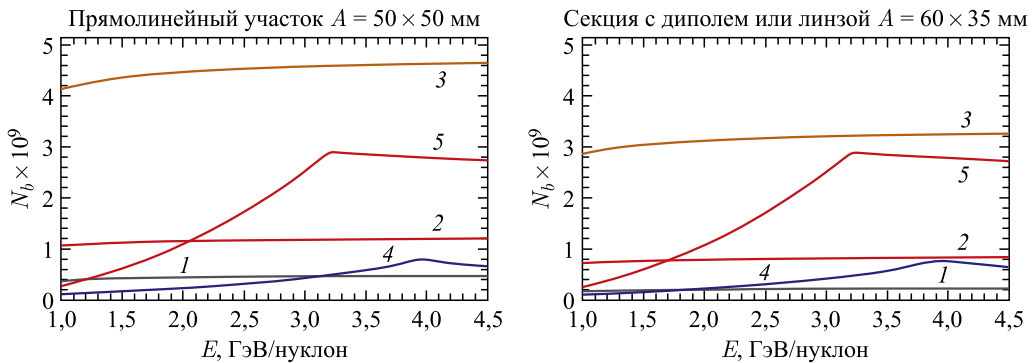


Рис. 2. Зависимость N_b ядер золота от энергии E : 1 — достаточное условие; 2, 3 — необходимое условие при ΔE (здесь для примера равных 30 и 450 эВ соответственно); 4 — базовая версия; 5 — проектная версия

в этой версии близка к условию резонансного размножения электронов (1), но интенсивность сгустка слишком мала для ускорения электронов до энергии, достаточной для выбивания с поверхности вакуумной камеры более одного электрона (здесь для примера принятой равной 30 эВ). Тогда как для проектной версии при энергии выше 1,5 ГэВ/нуклон в диполях и линзах и выше 2 ГэВ/нуклон в прямолинейных участках можно ожидать образование ЭО. Однако условие (2) не учитывает реальный потенциал сгустка. Поэтому все вышесказанное требует проведения новых оценок и расчетов.

Отметим, что методы расчета процесса образования ЭО известны [6, 7], но в то же время доступные программы [6, 7] не обладают универсальностью, поэтому была разработана и использована собственная программа. Для ее отладки были проведены исследования и сравнения результатов с существующими программами, описанными в [3].

ЭФФЕКТЫ, ВЫЗВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫМИ ОБЛАКАМИ

Пространственный заряд ЭО и поток вторичных электронов на стенках вакуумной камеры могут вызывать нежелательные эффекты, такие как: сдвиг частоты бетатронных колебаний, что впоследствии может привести к росту эмиттанса пучка; рост давления по причине десорбции газов с поверхности стенок камеры; дополнительная тепловая нагрузка на криогенные поверхности камеры и т. д. Оценка этих нежелательных эффектов приведена ниже.

Сдвиг частоты бетатронных колебаний. ЭО с объемной плотностью ρ_e порождает сдвиг частоты когерентных бетатронных колебаний $\Delta Q_{x/y}^{EC}$:

$$\Delta Q_{x/y}^{EC} = \rho_e \frac{r_p Z \overline{\beta_{x/y}} h_{y/x} L}{\gamma A h_x + h_y}.$$

Здесь r_p — классический радиус протона; Z и A — заряд ядра и атомная масса ионов или ядер сгустка; $\overline{\beta_{x/y}}$ — среднее значение бета-функции; $h_{y/x}$ — апертура вакуумной камеры; L — длина магнита, линзы или прямолинейного участка; γ — лоренц-фактор.

В проекте коллайдера максимально допустимое значение сдвига частоты принято равным $\Delta Q \leq 0,05$ во всем диапазоне энергий столкновений. Эта величина используется далее при определении критической величины коэффициента вторичной эмиссии со стенки вакуумной камеры из отношения $\Delta Q_{x/y}^{EC}/\Delta Q$ — вклада эффекта ЭО в сдвиг $\Delta Q_{x/y}$ (рис. 3).

Прирост давления и дополнительный теплоприток. В состоянии равновесия дополнительный прирост давления, создаваемый ЭО, может быть оценен по следующей формуле:

$$\Delta P = \frac{\Delta Q_{EC}}{S} A, \quad \Delta Q_{EC} = \frac{k_B T}{\Pi} \frac{d\Phi_{EC}}{dl} \eta_{EC}.$$

Здесь S — скорость откачки; A и Π — погонная площадь и периметр поперечного сечения вакуумной камеры коллайдера; T — абсолютная температура; $d\Phi_{EC}/dl$ — линейный поток электронов облака на стенки вакуумной камеры; η_{EC} — коэффициент электронно-стимулированной десорбции. Дополнительное газоотделение ΔQ_{EC} со стенок вакуумной камеры под действием бомбардировки электронами облака ее поверхности сопровождается дополнительным теплопритоком, а именно:

$$\Delta W_{EC} = \frac{k_B \overline{E_{EC}}}{A_{\perp}} \Delta Q_{EC}.$$

Здесь k_B — постоянная Больцмана; A_{\perp} — поперечная площадь вакуумной камеры коллайдера; $\overline{E_{EC}}$ — средняя энергия электронов облака, падающих на стенку вакуумной камеры.

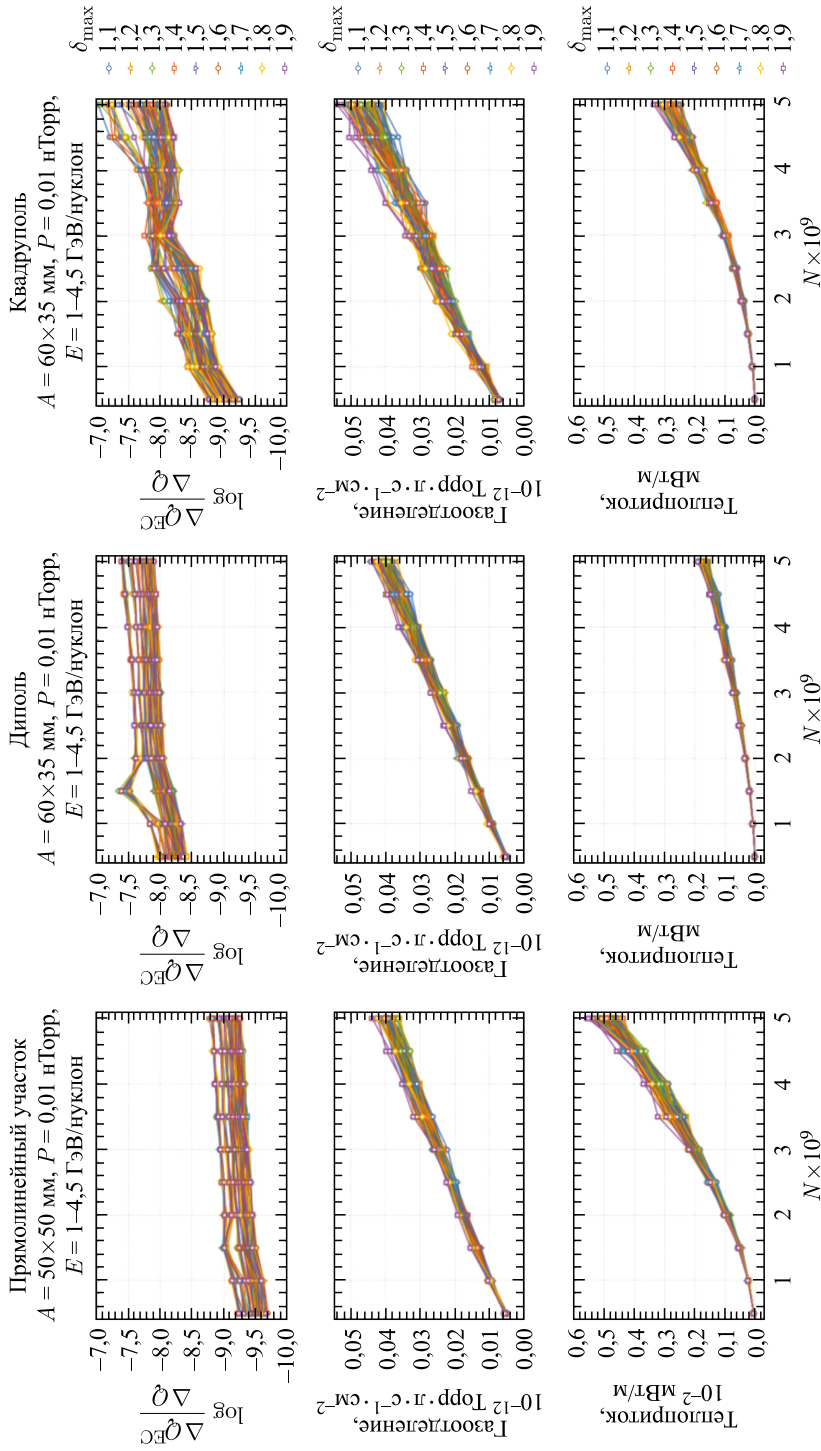


Рис. 3. Логарифм отношения сдвига частоты бетатронных колебаний частиц, вызванного ЭО, к сдвигу частоты бетатронных колебаний частиц, обусловленный пространственным зарядом пучка (верхний ряд); дополнительное газоотделение со стенки вакуумной камеры для $\eta_{ES} = 1$ (средний ряд); линейный теплоприток, вызванный электронным облаком (нижний ряд)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные расчеты процесса образования ЭО для параметров коллайдера (таблица) в широком диапазоне коэффициента вторичной эмиссии показывают следующее.

— Влияние эффекта электронных облаков на сдвиг частоты рабочей точки пренебрежимо мало (рис. 3, верхний ряд).

— Для коэффициента электронно-стимулированной десорбции $\eta_{ЕС} = 1$ (например, в работе [8] он принят равным 0,01) дополнительное газоотделение со стенки вакуумной камеры лежит в диапазоне 10^{-12} – 10^{-11} Торр·л·с⁻¹·см⁻² (рис. 3, средний ряд). Это близко к величине равновесного газоотделения (см., например, [9]) и может приводить к дополнительному приросту давления в несколько десятых долей нТорр, что может быть неприемлемо.

— Дополнительный теплоприток по кольцу коллайдера составляет величину на уровне не более 1 мВт/м (рис. 3, нижний ряд), что допустимо для криогенной системы коллайдера.

Отметим, что отдельные исследования процесса образования ЭО требуется провести для коллайдера, работающего в протонной моде [2].

Благодарности. Авторы выражают благодарность А. О. Сидорину за внимательное прочтение работы и многочисленные полезные предложения и ценные советы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gröbner O. // Proc. of the 10th Intern. Conf. on High Energy Accel., Protvino, 1977.
2. Kekelidze V. D., Matveev V. A., Meshkov I. N., Sorin A. S., Trubnikov G. V. // Phys. Part. Nucl. 2017. V. 48, No. 5. P. 727–741.
3. Philippov A. V., Monchinsky V. A., Kuznetsov A. B. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2010. V. 7, No. 7. P. 483–486.
4. Philippov A. V., Kuznetsov A. B., Meshkov I. N. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2011. V. 8, No. 10. P. 1087–1089.
5. Kozlov O., Meshkov I., Sidorin A., Trubnikov G. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 7. P. 934–936.
6. Rumolo G., Zimmermann F. CERN Report. CERN-SL-Note-2002-016. 2002.
7. Blaskiewicz M., Iriso U. BNL Report. C-A/AP/260. 2006.
8. Gröbner O. // Vacuum. 2001. V. 60. P. 25–34.
9. Kuznetsov A. B., Tuzikov A. V., Philippov A. V. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13, No. 7. P. 982–987.