

## РОСТ ПОТЕРЬ ПУЧКА ИОНОВ ЗОЛОТА В БУСТЕРЕ NICA ПРИ ДЕСОРБЦИИ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА

*А. Б. Кузнецов, А. В. Тузиков, А. В. Филиппов<sup>1</sup>*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Увеличение давления остаточного газа в вакуумной камере в процессе ускорения тяжелых ионов является одной из причин потери интенсивности в ускорителе. В данной работе приводятся результаты численных расчетов потерь пучка ионов золота  $^{197}\text{Au}^{31+}$  при взаимодействии с атомами и молекулами остаточного газа с учетом десорбции частиц, адсорбированных на поверхности вакуумной камеры бустера нуклотрона.

Heavy ions induced pressure rise is one of the machine limits. The calculation results of the gold ion beam  $^{197}\text{Au}^{31+}$  losses due to residual gas interaction in view of desorption of adsorbed particles on the Booster Nuclotron vacuum chamber surface are discussed.

PACS: 29.20.db; 29.20.dk; 29.27.Eg

### ВВЕДЕНИЕ

В проекте NICA [1] основной задачей бустера, как промежуточного синхротрона тяжелых ионов, являются накопление  $2 \cdot 10^9$  ионов золота  $^{197}\text{Au}^{31+}$  и ускорение их от энергии 3,2 МэВ/нуклон до энергии 578 МэВ/нуклон, достаточной для их последующей обдирки в канале транспортировки бустер–нуклотрон до состояния полностью голого ядра  $^{197}\text{Au}^{79+}$ , что существенно позволяет снизить требования к давлению остаточного газа в нуклотроне из-за уменьшения вероятности перезарядки ионов (у голых ядер имеет место только один канал перезарядки — рекомбинация). Применение электронного охлаждения в бустере при энергии ионов 65 МэВ/нуклон приведет к уменьшению продольного эмиттанса пучка до величины, требуемой для сжатия сгустка по завершении его ускорения в бустере.

Цикл ускорения ионов в бустере состоит из четырех частей (рис. 1): адиабатического захвата ионов в сепаратрису в течение 0,02 с на плато магнитного поля при энергии инжекции 3,2 МэВ/нуклон; ускорения ионов до 65 МэВ/нуклон в течение 0,4 с; электронного охлаждения ионов в течение 1 с на столе магнитного поля; ускорения ионов до энергии 578 МэВ/нуклон в течение 1,3 с.

---

<sup>1</sup>E-mail: philippov@jinr.ru

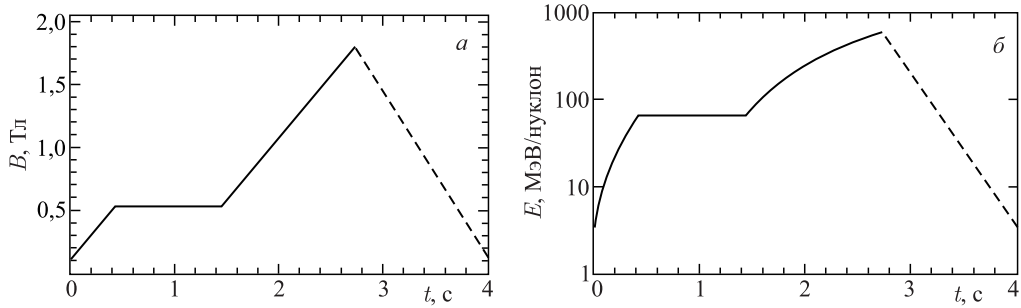


Рис. 1. Диаграммы рабочего цикла бустера — зависимость от времени магнитного поля (а) и роста энергии ионов  $^{197}\text{Au}^{31+}$  (б)

Вакуумная система бустера разделяется на два типа: «холодная» при близкой к температуре жидкого гелия и «теплая» при комнатной температуре. «Холодная» пучковая камера располагается внутри вакуумного изоляционного объема, который имеет две ступени откачки: предварительную и высоковакуумную. При общей длине бустера 210,96 м большую часть занимает «холодная» часть. Имеются два «теплых» прямолинейных промежутка, каждый длиной около 7 м: ВЧ-станция — второй промежуток и система электронного охлаждения — четвертый промежуток. Поверхность «холодной» части пучковой вакуумной камеры имеет температуру около 10 К, «теплой» — комнатную, около 300 К.

### МЕХАНИЗМЫ ПОТЕРЬ ПУЧКА В БУСТЕРЕ

Механизмы потерь пучка в ускорителях хорошо известны и описаны во многих работах (рис. 2 [2]). Основными процессами потерь многозарядных ионов в кольцевых ускорителях, оказывающими влияние на вакуум, являются перезарядка ускоряемых ионов на

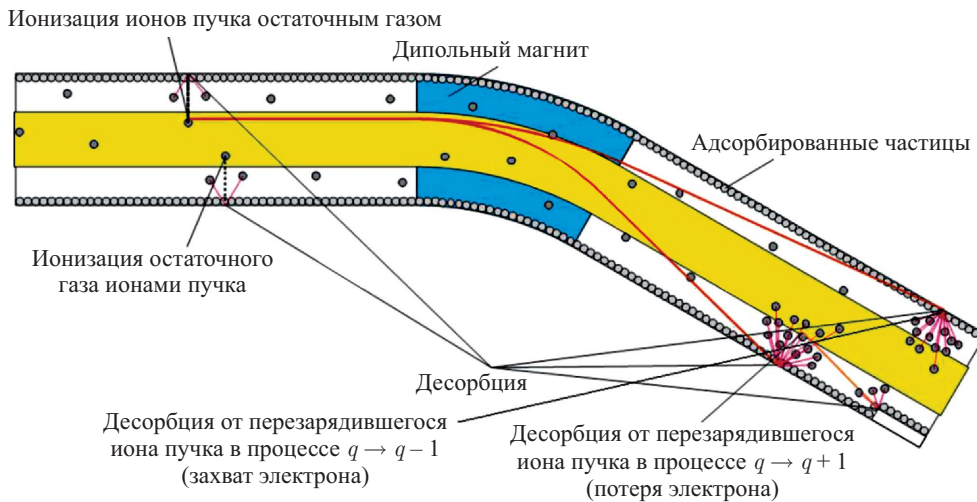


Рис. 2. Потери пучка заряженных частиц, ускоряемых в бустере [2]

молекулах остаточного газа и ионизация этих молекул. В первом случае перезаряженные ионы пучка отклоняются диполями периодической структуры и с ускоренной энергией под малым углом достигают стенок камеры ускорителя. Во втором случае ионы остаточного газа ускоряются потенциалом пучка и с малой энергией (около 30 эВ для бустера) падают на стенки перпендикулярно их поверхности. В обоих случаях в камеру поступает большое количество молекул, десорбированных со стенок камеры, однако первый процесс является доминирующим [3].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Потери частиц пучка описываются системой уравнений, полученных на основе результатов работы [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_q}{dt} = -N_q \sum_{\alpha} \langle \Gamma_{\alpha, q \rightarrow q-1} + \Gamma_{\alpha, q \rightarrow q+1} + \Gamma_{\alpha, q \rightarrow q+1}^{\text{Бете}} \rangle, \quad N_q|_{t=0} = N_{q,0}, \\ V \frac{\partial n_{\alpha}}{\partial t} = N_q \left( \sum_{\alpha} \langle \Gamma_{\alpha, q \rightarrow q-1} + \Gamma_{\alpha, q \rightarrow q+1} \rangle \eta_{\angle, \alpha} + \sum_{\alpha'} \langle \Gamma_{\alpha', q \rightarrow q+1}^{\text{Бете}} \rangle \eta_{\perp, \alpha' / \alpha} \right) - \\ \quad - n_{\alpha} S_{\alpha} + \frac{Q_{\alpha} A}{k_B T} + C_{\alpha} \frac{\partial^2 n_{\alpha}}{\partial z^2}, \\ n_{\alpha}|_{t=0} = n_{\alpha,0}, \quad n_{\alpha}|_{z=0} = n_{\alpha}|_{z=L}, \quad \frac{\partial n_{\alpha}}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial n_{\alpha}}{\partial z} \Big|_{z=L}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь  $N_q$  — интенсивность пучка, зависящая только от времени;  $n_{\alpha}$  — концентрация остаточного газа типа  $\alpha$ , зависящая от продольной координаты и времени;  $V$  — объем ускорителя;  $\eta_{\angle, \alpha}$  и  $\eta_{\perp, \alpha' / \alpha}$  — коэффициенты десорбции, зависящие только от продольной координаты;  $A$  — площадь поверхности камеры;  $Q_{\alpha}$  — газоотделение, зависит только от продольной координаты;  $S_{\alpha}$  — скорость откачки, зависит только от продольной координаты;  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура, зависит только от продольной координаты;  $\Gamma_{\alpha, q \rightarrow q+1}$  и  $\Gamma_{\alpha, q \rightarrow q-1}$  — соответственно скорость потери одного электрона и скорость захвата одного электрона ионом пучка при взаимодействии с атомами или молекулами остаточного газа;  $\Gamma_{\alpha, q \rightarrow q+1}^{\text{Бете}}$  — скорость потери одного электрона атомом или молекулой остаточного газа при взаимодействии с ионом пучка;  $C_{\alpha}$  — проводимость вакуумной камеры, зависит от продольной координаты;  $L$  — периметр бустера. Скорость перезарядки равна произведению величин — скорости иона, сечения процесса перезарядки (взяты из работы [4]) и концентрации остаточного газа. Отметим здесь, что в первом уравнении системы (1) скорости процессов перезарядки должны быть усреднены по периметру кольца бустера.

Система (1) дополнена значениями: интенсивности в начальный момент времени —  $N_{q,0}$ ; распределениями концентраций остаточного газа по кольцу бустера в начальный момент времени —  $n_{\alpha,0}$ ; периодическими граничными условиями для концентраций остаточного газа и ее первой производной.

### НАЧАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА

В качестве распределения концентраций остаточного газа по кольцу бустера в начальный момент времени бралось решение задачи (2):

$$C_{\alpha} \frac{d^2 n_{\alpha}}{dz^2} - n_{\alpha} S_{\alpha} + \frac{Q_{\alpha} A}{k_B T} = 0, \quad n_{\alpha}|_{z=0} = n_{\alpha}|_{z=L}, \quad \left. \frac{dn_{\alpha}}{dz} \right|_{z=0} = \left. \frac{dn_{\alpha}}{dz} \right|_{z=L}. \quad (2)$$

Будем искать решение системы (2) на половине периметра бустера, начало отсчета совпадает с началом первого «теплого» прямолинейного промежутка (из описанных выше в [1]). Определим решение системы (2) в двух разных подходах:

1) с «реальным» расположением насосов в бустере (насос — точечный, скорости откачки насосов — равные, положение насосов — в центре каждого промежутка между элементами магнитной структуры бустера);

2) с усредненной откачкой в «теплых» и «холодных» частях бустера.

В первом случае, с «реальным» расположением насосов, область моделирования задачи будет иметь 46 участков: на 44 границах между участками находятся насосы, одна граница задает переход «тепло»/«холод» и на двух границах задается периодичность решения. Система уравнений (2) примет вид

$$\frac{d^2 n_{\alpha,i}}{dz^2} - \omega_{\alpha,i}^2 n_{\alpha,i} + \lambda_{\alpha,i} = 0, \quad i = \overline{1, 46}. \quad (3)$$

Отметим, что в «теплой» части в системе (3) для концентраций отсутствует второй член, он равен нулю. Решение системы (3) выглядит так:

$$n_{\alpha,0} = \begin{cases} -\frac{\lambda_{\alpha,i}(z-z_{i-1})^2}{2} + A_{\alpha,i}(z-z_{i-1}) + B_{\alpha,i}, & z_{i-1} \leq z < z_i, \quad i = \overline{1, 2}, \\ \frac{\lambda_{\alpha,i}}{\omega_{\alpha,i}^2} + A_{\alpha,i}e^{\omega_{\alpha,i}(z-z_{i-1})} + B_{\alpha,i}e^{-\omega_{\alpha,i}(z-z_{i-1})}, & z_{i-1} \leq z < z_i, \quad i = \overline{3, 46}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $z_i$  — координаты границ участков;  $z_0$  и  $z_{46}$  — начало и конец области моделирования; выражения для  $\omega_{\alpha,i}$  и  $\lambda_{\alpha,i}$  приведены в (5):

$$\omega_{\alpha,i} = \sqrt{\frac{S_{\alpha,\text{хол}}}{C_{\alpha,i}}}, \quad \lambda_{\alpha,i} = \frac{Q_{\alpha,i} A}{k_B T_{\alpha,i} C_{\alpha,i}}, \quad \Omega_{\alpha,i} = \sqrt{\frac{S_{\alpha,i}}{C_{\alpha,i}}}; \quad (5)$$

$A_{\alpha,i}$  и  $B_{\alpha,i}$  — константы, определяющиеся условиями сшивки на границах области моделирования, приведены в (6).

Первая пара уравнений в (6) задает условие сшивки в «теплой» части, вторая — на границе «тепло»/«холод», третья — в «холодной части» и четвертая задает условие

периодичности решения (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{\alpha, \text{тепл}, 1} \Big|_{z=z_1-z_0} = n_{\alpha, \text{тепл}, 2} \Big|_{z=0}, \\ \Omega_{\alpha, 1}^2 n_{\alpha, \text{тепл}, 1} \Big|_{z=z_1-z_0} = n'_{\alpha, \text{тепл}, 2} \Big|_{z=0} - n'_{\alpha, \text{тепл}, 1} \Big|_{z=z_1-z_0}, \\ n_{\alpha, \text{тепл}, 2} \Big|_{z=z_2-z_1} = n_{\alpha, \text{хол}, 3} \Big|_{z=0}, \\ n'_{\alpha, \text{тепл}, 2} \Big|_{z=z_2-z_1} = n'_{\alpha, \text{хол}, 3} \Big|_{z=0}, \\ n_{\alpha, \text{хол}, i} \Big|_{z=z_i-z_{i-1}} = n_{\alpha, \text{хол}, i+1} \Big|_{z=0}, \\ \Omega_{\alpha, i}^2 n_{\alpha, \text{хол}, i} \Big|_{z=z_i-z_{i-1}} = n'_{\alpha, \text{хол}, i+1} \Big|_{z=0} - n'_{\alpha, \text{хол}, i} \Big|_{z=z_i-z_{i-1}}, \\ n_{\alpha, \text{хол}, 46} \Big|_{z=z_{46}-z_{45}} = n_{\alpha, \text{тепл}, 1} \Big|_{z=0}, \\ n'_{\alpha, \text{хол}, 46} \Big|_{z=z_{46}-z_{45}} = n'_{\alpha, \text{тепл}, 1} \Big|_{z=0}, \quad i = \overline{3, 45}. \end{array} \right. \quad (6)$$

Величина  $\Omega_{\alpha, i}$  определена в (5). В системе (3) параметрами являются  $S_{\alpha, \text{хол}}$  и  $S_{\alpha, i}$  в (5) — скорость откачки криогенной поверхности и скорость насоса соответственно.

Во втором случае, с усредненной откачкой, будем искать решение системы (2) отдельно в «теплой»/«холодной» частях:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 n_{\alpha, \text{тепл}}}{dz^2} - \omega_{\alpha, \text{тепл}}^2 n_{\alpha, \text{тепл}} + \lambda_{\alpha, \text{тепл}} = 0, \quad n_{\alpha, \text{тепл}} \Big|_{z=0} = n_{\alpha, \text{хол}} \Big|_{z=L_{\text{хол}}}, \\ \frac{d^2 n_{\alpha, \text{хол}}}{dz^2} - \omega_{\alpha, \text{хол}}^2 n_{\alpha, \text{хол}} + \lambda_{\alpha, \text{хол}} = 0, \quad n_{\alpha, \text{хол}} \Big|_{z=0} = n_{\alpha, \text{тепл}} \Big|_{z=L_{\text{тепл}}}. \end{array} \right. \quad (7)$$

Здесь выражения для  $\omega_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}}$  и  $\lambda_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}}$  приведены в (8),  $L_{\text{тепл}/\text{хол}}$  — длины «теплой»/«холодной» частей бустера, принятые соответственно 7 и 98,48 м. Решение системы (7) имеет вид

$$n_{\alpha, 0} = \begin{cases} \frac{N_{\alpha, \text{тепл}}}{D_{\alpha, \text{тепл}}}, & 0 \leq z < L_{\text{тепл}}, \\ \frac{N_{\alpha, \text{хол}}}{D_{\alpha, \text{хол}}}, & L_{\text{тепл}} \leq z < L. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь выражения для  $N_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}}$  и  $D_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}}$  приведены в (10). Величины  $C_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}}$ ,  $Q_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}}$ ,  $s_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}}$  и  $T_{\text{тепл}/\text{хол}}$  определяют проводимость, газоотделение, скорость откачки и температуру соответственно в «теплой»/«холодной» частях бустера (рис. 3) и являются параметрами при решении системы (7). Связь параметров сил откачки на «теплом»/«холодном» участках в усредненной модели с параметрами сил откачки в модели с «реальной» расстановкой насосов имеет вид

$$s_{\alpha, \text{тепл}} = \frac{S_{\alpha, 2}}{L_{\text{тепл}}}, \quad s_{\alpha, \text{хол}} = S_{\alpha, \text{хол}} + \frac{\sum_{i=4}^{46} S_{\alpha, i}}{L_{\text{хол}}}. \quad (9)$$

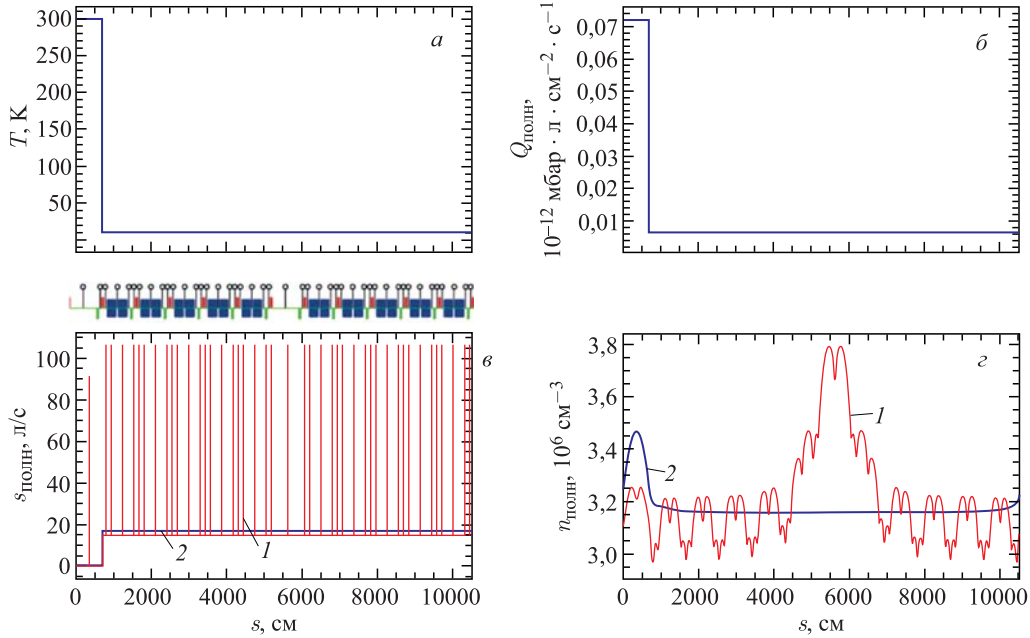


Рис. 3 (цветной в электронной версии). а, б) Температура и газоотделение. в, з) Скорость откачки и концентрация: красная (линия 1) — с «реальным» расположением насосов (4), синяя (линия 2) — с усредненной откачкой (8), на рис. в сверху показана магнитная структура бустера с расставленными насосами

На рис. 3 приведем сравнение решений (4) и (8), приняв во внимание связь (9) параметров задач (3) и (7):

$$\begin{aligned}
 N_{\alpha, \text{тепл}} &= \lambda_{\alpha, \text{хол}} \omega_{\alpha, \text{тепл}}^2 \cosh \frac{\omega_{\alpha, \text{тепл}} (2z - L_{\text{тепл}})}{2} \operatorname{sech} \frac{\omega_{\alpha, \text{тепл}} L_{\text{тепл}}}{2} + \\
 &+ \lambda_{\alpha, \text{тепл}} \omega_{\alpha, \text{хол}} \omega_{\alpha, \text{хол}} (1 - \cosh \omega_{\alpha, \text{тепл}} z) + \\
 &+ \lambda_{\alpha, \text{тепл}} \omega_{\alpha, \text{хол}} \left( \omega_{\alpha, \text{хол}} \sinh \omega_{\alpha, \text{тепл}} z + \omega_{\alpha, \text{тепл}} \coth \frac{\omega_{\alpha, \text{хол}} L_{\text{хол}}}{2} \right) \tanh \frac{\omega_{\alpha, \text{тепл}} L_{\text{тепл}}}{2}, \\
 D_{\alpha, \text{тепл}} &= \omega_{\alpha, \text{хол}} \omega_{\alpha, \text{тепл}}^2 \left( \omega_{\alpha, \text{хол}} + \coth \frac{\omega_{\alpha, \text{хол}} L_{\text{хол}}}{2} \omega_{\alpha, \text{тепл}} \tanh \frac{\omega_{\alpha, \text{тепл}} L_{\text{тепл}}}{2} \right), \\
 N_{\alpha, \text{хол}} &= \lambda_{\alpha, \text{тепл}} \omega_{\alpha, \text{хол}}^2 \cosh \frac{\omega_{\alpha, \text{хол}} (2z - L_{\text{хол}})}{2} \sinh \frac{\omega_{\alpha, \text{тепл}} L_{\text{тепл}}}{2} + \\
 &+ \lambda_{\alpha, \text{хол}} \omega_{\alpha, \text{тепл}} \omega_{\alpha, \text{хол}} \cosh \frac{\omega_{\alpha, \text{тепл}} L_{\text{тепл}}}{2} \sinh \frac{\omega_{\alpha, \text{хол}} L_{\text{хол}}}{2} - \\
 &- 2 \lambda_{\alpha, \text{хол}} \omega_{\alpha, \text{тепл}}^2 \sinh \frac{\omega_{\alpha, \text{хол}} z}{2} \sinh \frac{\omega_{\alpha, \text{хол}} (z - L_{\alpha, \text{хол}})}{2} \sinh \frac{\omega_{\alpha, \text{тепл}} L_{\text{тепл}}}{2}, \\
 D_{\alpha, \text{хол}} &= \omega_{\alpha, \text{хол}}^3 \omega_{\alpha, \text{тепл}} \cosh \frac{\omega_{\alpha, \text{тепл}} L_{\text{тепл}}}{2} \sinh \frac{\omega_{\alpha, \text{хол}} L_{\text{хол}}}{2} + \\
 &+ \omega_{\alpha, \text{хол}}^2 \omega_{\alpha, \text{тепл}}^2 \cosh \frac{\omega_{\alpha, \text{хол}} L_{\text{хол}}}{2} \sinh \frac{\omega_{\alpha, \text{тепл}} L_{\text{тепл}}}{2};
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\omega_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}} = \sqrt{\frac{s_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}}}{C_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}}}}, \quad \lambda_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}} = \frac{Q_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}} A}{k_B T_{\text{тепл}/\text{хол}} C_{\alpha, \text{тепл}/\text{хол}}}$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты решения нестационарной задачи с пучком (1) для магнитного цикла бустера (см. рис. 1) с начальным стационарным распределением в форме (8) и параметрами скоростей усредненной откачки, газоотделения и коэффициентов десорбции (таблица) приведены на рис. 4.

Газовый состав был выбран в виде  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ; начальная интенсивность пучка ионов золота  $^{197}\text{Au}^{31+}$  —  $2 \cdot 10^9$ .

**Параметры скоростей усредненной откачки, газоотделения и коэффициентов десорбции (данные о коэффициентах десорбции взяты из работы [5])**

Параметр	$\text{H}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{CO}$	$\text{CO}_2$
$s_{\text{тепл}}$ , л/с/м	0,46	0,56	5,76	6,25
$s_{\text{хол}}$ , л/с/м	2,41	145,81	114,26	74,94
$Q_{\text{тепл}}$ , $10^{-12}$ мбар · л · см $^{-2}$ · с $^{-1}$	0,025	0,015	0,018	0,014
$Q_{\text{хол}}$ , $10^{-12}$ мбар · л · см $^{-2}$ · с $^{-1}$	0,003	0,001	0,001	0,001
$\eta_{\perp, \text{тепл}}(^{197}\text{Au}^{31+})$	150	5	1000	250
$\eta_{\perp, \text{хол}}(^{197}\text{Au}^{31+})$	1500	50	10000	2500
$\eta_{\perp, \text{тепл}}(\text{H}_2^+)$	0,54	0,54	0,54	0,54
$\eta_{\perp, \text{тепл}}(\text{CH}_4^+)$	0,04	0,05	0,07	0,11
$\eta_{\perp, \text{тепл}}(\text{CO}^+)$	0,25	0,29	0,29	0,33
$\eta_{\perp, \text{тепл}}(\text{CO}_2^+)$	0,14	0,14	0,14	0,14
$\eta_{\perp, \text{хол}}(\text{H}_2^+)$	0,33	0,33	0,33	0,33
$\eta_{\perp, \text{хол}}(\text{CH}_4^+)$	0,02	0,03	0,04	0,07
$\eta_{\perp, \text{хол}}(\text{CO}^+)$	0,15	0,17	0,17	0,2
$\eta_{\perp, \text{хол}}(\text{CO}_2^+)$	0,09	0,09	0,09	0,09

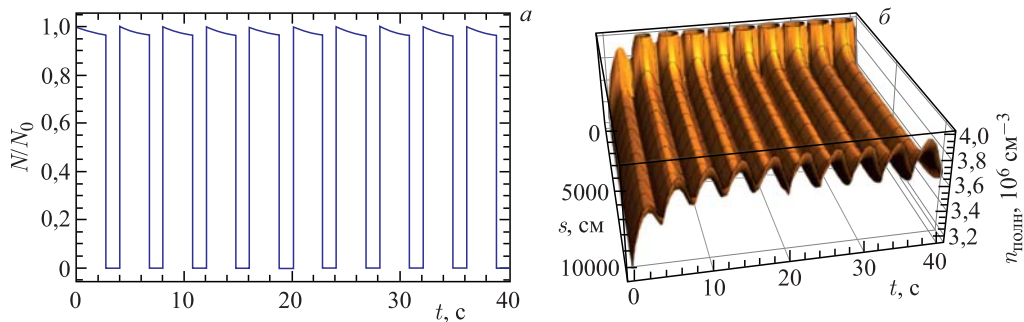


Рис. 4. Зависимость потерь пучка ионов золота  $^{197}\text{Au}^{31+}$  от времени (а) и полная концентрация остаточного газа (б), потери составляют около 2–3 %, среднее давление в вакуумной камере около 0,01 нТорр

Отметим, что в результате моделирования газовый состав в «теплой» части бустера составил около 90 %  $\text{H}_2$  и суммарно 10 % —  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ; в «холодной» части — около 100 %  $\text{H}_2$ .

## ВЫВОДЫ

Представлена математическая модель для расчета потерь пучка ионов золота  $^{197}\text{Au}^{31+}$  при взаимодействии с атомами и молекулами остаточного газа с учетом десорбции частиц, адсорбированных на поверхности вакуумной камеры бустера нуклотрона.

Найдены аналитические решения стационарной задачи без пучка для концентраций остаточного газа в вакуумной камере бустера нуклотрона, учитывающие выбранное расположение насосов, а также решение для усредненной по кольцу откачки.

На примере решения нестационарной задачи без пучка с усредненной откачкой показано, что за определенное время распределение концентраций остаточного газа приходит к стационарному состоянию.

Показано, что при величинах скоростей усредненной откачки, газоотделения и коэффициентов десорбции в «теплой»/«холодной» частях бустера нуклотрона, близких к ожидаемым [1], потери пучка ионов золота  $^{197}\text{Au}^{31+}$  составляют величину около 3 %, что соответствует среднему по кольцу ускорителя давлению остаточного газа около 0,01 нТорр.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический проект ускорительного комплекса NICA. Дубна, 2015.
2. Omet C. et al. // New J. Phys. 2006. V. 8. P. 284.
3. Mahner E. Technical Design of the LEIR Vacuum System. LHC-VAC/EM Vacuum Technical Note 2002-04.
4. Бейгман И. Л., Толстихина И. Ю., Шевелько В. П. // ЖТФ. 2008. Т. 78, вып. 5. С. 15–21.
5. Rossi A., Hilleret N. // LHC Project Report. 2003. V. 674.