

6555

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛА

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-6555



В.Георге, М.Л.Иовнович, В.Г.Новиков,
В.А.Прейзендорф, Н.Б.Рубин, В.П.Саранцев

РАСЧЕТ НАКОПЛЕНИЯ ИОНОВ
В ЭЛЕКТРОННОМ КОЛЬЦЕ КОЛЛЕКТИВНОГО
УСКОРИТЕЛЯ

ОТДЕЛ НОВЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ

1972

P9-6555

В.Георге, М.Л.Иовнович, В.Г.Новиков,
В.А.Прейзендорф, Н.Б.Рубин, В.П.Саранцев

РАСЧЕТ НАКОПЛЕНИЯ ИОНОВ
В ЭЛЕКТРОННОМ КОЛЬЦЕ КОЛЛЕКТИВНОГО
УСКОРИТЕЛЯ

В данной работе рассмотрен ряд вопросов, связанных с накоплением многозарядных ионов в электронном кольцевом сгустке коллективного ускорителя ионов /1/. Частично эта проблема была уже рассмотрена в /2-4/.

Необходимый для коллективного ускорения электронный кольцевой сгусток с требуемыми параметрами создается в установке, названной адгезатором /5/. Существует несколько способов инъекции ионов в электронное кольцо, основанных на том, что в результате столкновений нейтральных атомов газа с электронами кольца образуются ионы, которые удерживаются в кольце его кулоновским полем.

В первой части работы рассмотрено накопление ионов при сжатии кольца в среде газа, ионы которого требуется накопить в кольце. При этом накопление идет непрерывно от момента инъекции электронов в адгезатор до ускорения кольца как целого. Управлять процессом количественно можно, меняя давление газа в камере адгезатора.

Во второй части работы рассматривается процесс накопления ионов из потока /как непрерывного, так и импульсного/ атомов выбранного газа, пересекающего электронное кольцо, предварительно сжатое до конечного состояния. В этом случае управлять процессом можно как количественно, варьируя давление и скорость струи газа, так и во времени, меняя момент включения и выключения источника газа. При этом струя газа должна быть хорошо сформирована и иметь четкие границы, что предъявляет определенные требования к источнику газа. При обоих способах инъекции предполагается, что парциальные давления всех остальных газов много меньше инжектируемого и их накоплением в электронном кольце можно пренебречь.

Предварительные результаты данной работы частично изложены в /6/.

Накопление ионов в процессе сжатия кольца

Здесь мы рассмотрим накопление ионов азота и гелия из газовой среды в процессе сжатия кольца в адгезаторе. Потребуем также, чтобы частота радиальных бетатронных колебаний электронов в кольце не достигала резонансного значения, равного 1. Это дает нам условие на допустимое давление накапливаемого газа в камере адгезатора.

Поведение кольца в процессе его сжатия определяется адiabатическими инвариантами самосогласованных уравнений движения электронов в кольце^{/5/}. Эти инварианты имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} J_r &= \gamma_{\perp} R \beta_{\theta} g^2 \sqrt{k_r^2 - \Delta v_r^2}; \\ J_z &= \gamma_{\perp} R \beta_{\theta} b^2 \sqrt{k_z^2 - \Delta v_z^2}. \end{aligned} \quad /1/$$

Здесь

$$k_r^2 = (1 - n)(1 + \mu P) - \frac{\mu P}{2}, \quad k_z^2 = n(1 + \mu P) - \frac{\mu P}{2}; \quad /2/$$

$$\Delta v_r^2 = \frac{4\mu}{g(b+g)\beta_{\theta}^2} \left(\frac{1}{\gamma_{\perp}^2} - \frac{\sum k N_k}{N_e} \right); \quad /3/$$

$$\Delta v_z^2 = \Delta v_r^2 \frac{g}{b}; \quad /4/$$

где g и b - полуоси эллиптического сечения кольца, отнесенные к его радиусу R / g - по оси r , b - по оси z /; β_{θ} - отнесенная к скорости света c θ -вая скорость электронов, $\gamma_{\perp} = (1 - \beta_{\theta}^2)^{-1/2}$,

k - кратность ионизации иона, N_k - число ионов с данным k , $\mu = \frac{r_0 N_e}{2\pi R \gamma_{\perp}}$, r_0 - классический радиус электрона, N_e - число электронов в кольце, $P = 2 \ln \left(\frac{16}{b+g} \right)$, $n = - \frac{R}{B_z} \frac{\partial B_z}{\partial z}$ - показатель спада магнитного поля.

Вторые члены скобок /3/ и /4/, отсутствующие в /5/, характеризуют ослабление собственного кулоновского поля электронного кольца за счет ионов.

Кроме этих инвариантов необходимо также учитывать адиабатический инвариант равновесного движения, дающий связь между энергией и радиусом кольца

$$\gamma_{\perp} R \approx \text{const} \quad /5/$$

Адиабатические инварианты позволяют в принципе найти соотношения, связывающие начальные и конечные размеры кольца

$$\frac{b_f}{b_0} = \left[\frac{k_{z_0}^2 - \Delta v_{z_0}^2}{k_{z_f}^2 - \Delta v_{z_f}^2 (b_f, g_f, N_k)} \right]^{1/4},$$

$$\frac{g_f}{g_0} = \left[\frac{k_{r_0}^2 - \Delta v_{r_0}^2}{k_{r_f}^2 - \Delta v_{r_f}^2 (b_f, g_f, N_k)} \right]^{1/4} \quad /6/$$

Индексы "0" и "f" относятся к начальному и конечному состояниям.

Как видно из /6/, конечные размеры кольца зависят от количества ионов в нем, которое, в свою очередь, определяется размерами и характером сжатия кольца. Поэтому к системе уравнений /6/ необходимо добавить уравнения, описывающие накопление ионов в кольце.

При изучении процесса накопления ионов будем исходить из следующих предположений, сформулированных в /4/:

а/ кинетическая энергия нейтральных атомов и ионов /в момент образования/ предполагается достаточно малой /скорости близки к тепловым/;

б/ пренебрегается многократной ионизацией, вероятность которой много меньше однократной, и ионизация считается ступенчатой, то есть предполагается, что ионы заряда k образуются из ионов с зарядом $k-1$; тогда то и так

в/ процессами рекомбинации пренебрегается; тогда то и так

г/ не учитываются также соударения между тяжелыми частицами, сопровождающиеся процессами ионизации и перезарядки.

Это справедливо при $\frac{N_k}{N_e} \ll \frac{A^{1/2}}{10 k^{3/2}}$, где A - массовое число иона.

Кроме этих предположений будем считать, что все образовавшиеся ионы двигаются вместе с кольцом и принимают в дальнейшем

участие в процессе ступенчатой ионизации. Первая часть сделанного утверждения не вызывает сомнений, так как ускорения и скорости, которые испытывает кольцо при сжатии по большому радиусу, очень малы /на несколько порядков меньше, чем при ускорении кольца в ускоряющей системе/, поляризация ионного сгустка относительно электронного практически отсутствует и все ионы остаются в потенциальной яме электронного кольца.

Что касается второй части предположения, то ее мы обсудим в дальнейшем.

При сделанных предположениях процесс накопления ионов в кольце описывается следующей системой уравнений, записанной в отличие от /4/ не для плотностей ионов, а для их полного числа

$$\begin{aligned} \frac{d N_0}{d t} &= \bar{\Lambda}_a n_a - \bar{\Lambda}_0 \frac{N_0}{V}, \\ \frac{d N_1}{d t} &= \bar{\Lambda}_1 \frac{N_0}{V} - \bar{\Lambda}_1 \frac{N_1}{V}, \\ \frac{d N_k}{d t} &= \bar{\Lambda}_{k-1} \frac{N_{k-1}}{V} - \bar{\Lambda}_k \frac{N_k}{V}, \quad 1 < k \leq Z \end{aligned} \quad /7/$$

с начальными условиями $N_0(0) = n_a V$, $N_1(0) = 0$, $N_k(0) = 0$.

Здесь $\bar{\Lambda}_k = N_e \sigma_k c$, $1 \leq k \leq Z$, где Z - атомный номер элемента; σ_k - сечение ионизации k -кратно ионизованного атома, причем $\sigma_Z = 0$; $\bar{\Lambda}_a = S u$, $\bar{\Lambda}_0 = \bar{\Lambda}_1 + \bar{\Lambda}_a$, $\bar{\Lambda}_1 = N_e \sigma_0 c$; S - площадь поверхности, через которую нейтральные атомы попадают в кольцо, u - среднее значение нормальной к поверхности S компоненты скорости нейтрального атома, V - объем кольца; n_a - плотность нейтральных атомов в окрестности кольца.

В системе /7/ объем кольца $V = 2\pi^2 R^3 b g$ является функцией времени, зависящей от процесса накопления ионов, влияние которых входит в выражение /6/ для b и g . Будем считать эту зависимость размеров кольца от ионов слабой. В адиабатически растущем, почти однородном по r магнитном поле адгезатора $R \approx B_z^{-1/2}$,

а $\frac{b(t)}{b_0} \approx 1$ и $\frac{g(t)}{g_0} \approx 1$. Тогда $V \approx B_z^{-3/2}$ и, поскольку магнитное поле

изменяется по закону $B_z = B_0 + B_1 \sin \frac{2\pi}{T} t$, $V(t)$ можно аппроксимировать следующей функцией

$$V(t) = V_0 \left\{ 1 + \left[\left(\frac{V_0}{V_f} \right)^{2/3} - 1 \right] \sin \frac{2\pi}{T} t \right\}^{-3/2}, \quad 0 < t < \frac{T}{4}, \quad /8/$$

где V_0 и V_f - начальный и конечный объемы кольца, T - период внешнего магнитного поля. При этом предполагается, что накопление ионов сказывается лишь на конечном объеме кольца V_f , а закон изменения объема /8/ остается прежним.

К сожалению, в литературе нет надежных формул для определения сечения ионизации ионов релятивистскими электронами. Поэтому для расчетов использовалась следующая приближенная формула /7/

$$\sigma_k = \pi r_0^2 \frac{m c^2}{I_k} \ell_n \frac{E}{I_k}, \quad /9/$$

где m - масса покоя, а E - кинетическая энергия электрона, I_k - потенциал ионизации k -кратно ионизованного атома. Потенциалы ионизации I_k для $k=0-9$ взяты нами из /8/.

Формула /9/ хорошо согласуется с экспериментальными данными для водорода и гелия, но дает сильно заниженные значения для азота. Поэтому при расчете накопления азота в формулу /9/ был введен некоторый нормировочный коэффициент $k_H \approx 5$, который, сохраняя общий характер зависимости между сечениями ионизации, дает для $\sigma_{O_{N_2}}$ значение, близкое к экспериментальному.

Используя все сказанное выше, методом последовательных приближений мы провели расчет накопления ионов гелия и азота из газовой среды в процессе сжатия кольца при следующих его параметрах, характерных для существующего адгезатора: $R_0 = 38$ см, $\bar{g}_0 = g_0 R_0 = 1,5$ см, $\bar{b}_0 = b_0 R_0 = 0,75$ см, $\gamma_{L_0} = 4$, $N_e = 5 \cdot 10^{12}$, $n_0 = 0,5$, $R_f = 6$ см, $n_f = 0,06$, $T = 800$ мксек, время накопления $\tau = T/4 = 200$ мксек. Результаты расчета приведены в таблицах 1 и 2.

Если мы хотим, чтобы частота радиальных бетатронных колебаний ν_r не достигала резонансного значения, равного единице, то из таблиц 1 и 2 получаем следующие требования на давление накапливаемого газа в камере адгезатора: $p_{He} < 2 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст., $p_{N_2} < 2 \cdot 10^{-8}$ мм рт.ст. Как видно из таблиц, при таких давлениях справедливо сделанное предположение о слабом влиянии ионов на размеры кольца.

Остановимся теперь на сделанном ранее предположении, что все образовавшиеся ионы принимают участие в процессе ступенчатой ионизации. Амплитуда колебаний ионов при адиабатическом изменении частоты их колебаний Ω_i меняется по закону $a_i \approx \Omega_i^{-1/2}$.

В свою очередь, $\Omega_i \approx V^{-1/2} \approx R^{-3/2}$ и, следовательно, $a_i \approx R^{3/4}$. Аналогичный результат получен в /9/. Таким образом, размеры ионного сгустка затухают медленнее, чем размеры электронного сгустка. В результате некоторое число ионов, образовавшихся в начале сжатия на краю сгустка и имеющих большие начальные амплитуды, часть времени находится за пределами электронного сгустка и не участвует при этом в процессе ионизации. К сожалению, при выбранной схеме расчета учесть это не представляется возможным и поэтому полученные результаты по числу ионов являются несколько завышенными. Однако эта погрешность не очень велика, т.к. на начальном этапе сжатие кольца происходит очень быстро и число образовавшихся за это время ионов, не полностью участвующих в процессе ионизации, невелико. Так, например, время сжатия до $R = 20$ см составляет 4%, а до $R = 10$ см - 15% от общего времени сжатия кольца. Таким образом, основной процесс накопления ионов происходит при малых изменениях радиуса, когда разница в затухании размеров электронного и ионного сгустков незначительна.

2. Накопление ионов в сформированном кольце

Здесь мы рассмотрим накопление многозарядных ионов атомарного азота, аргона и ксенона в предварительно сформированном кольце с параметрами, которые предполагается получить во вновь проектируемом адгезаторе - II: $N_e = 10^{14}$, $R = 3,5-4$ см, $\gamma_{\perp} = 40$, $b = g = 0,05$ см. Накопление ионов происходит из струи атомов выбранного газа, пересекающей электронное кольцо вдоль оси Z . Если не учитывать изменения поперечных размеров кольца в процессе накопления, то в системе уравнений /7/, описывающей этот процесс, можно перейти от полного числа ионов N_k к их плотности n_k . В результате получаем следующую систему уравнений

$$n_0 = (n_a - n_0) \Lambda_a \theta(t) - \Lambda_i n_0,$$

$$n_1 = \Lambda_i n_0 - \Lambda_1 n_1, \quad /10/$$

$$n_k = \Lambda_{k-1} n_{k-1} - \Lambda_k n_k, \quad 1 < k \leq Z,$$

которую можно решить аналитически /4/. Здесь $\Lambda_i = \frac{\bar{\Lambda}_i}{V}$, $\Lambda_a = \frac{\bar{\Lambda}_a}{V}$, $\Lambda_k = \frac{\bar{\Lambda}_k}{V}$, $\theta(t)$ - функция, зависящая от способа напуска газа. Начальные условия $n_k = n_a \delta_{0k}$.

2.1. Непрерывный напуск газа

В случае непрерывной струи газа $\theta(t) = 1$. Тогда решение системы /10/ запишем в следующем виде:

$$f_0(t) = \frac{n_0}{n_a} = \frac{1}{\Lambda_0} (\Lambda_a + \Lambda_i e^{-\Lambda_0 t}),$$

$$f_k(t) = \frac{n_k}{n_a} = \frac{\Lambda_i}{\Lambda_0} \left(\frac{\Lambda_a}{\Lambda_k} + \sum_{n=0}^k A_{kn} e^{-\Lambda_n t} \right), \quad 1 \leq k \leq Z$$

/11/

$$f_Z(t) = \frac{n_Z}{n_a} = \frac{\Lambda}{\Lambda_0} \left(\Lambda_a t + B - \Lambda_{Z-1} \sum_{n=0}^{Z-1} \frac{A_{Z-1n}}{\Lambda_n} e^{-\Lambda_n t} \right),$$

где

$$A_{kn} = \left(1 - \frac{\Lambda_a}{\Lambda_n} \right) \frac{\prod_{m=0}^{k-1} \Lambda_m}{\prod_{\substack{\ell=0 \\ \ell \neq n}}^k (\Lambda_\ell - \Lambda_n)}, \quad 0 \leq n \leq k \leq Z-1$$

$$B = 1 - \Lambda_a \sum_{n=0}^{Z-1} \frac{1}{\Lambda_n},$$

$$\Lambda_0 = \Lambda_a + \Lambda_i.$$

Суммарная плотность тяжелых частиц в объеме кольца

$$f(t) = \sum_{\substack{k=0 \\ n_a}}^Z = \frac{1}{\Lambda_0^2} (\Lambda_0^2 - \Lambda_0 \Lambda_i + \Lambda_i^2) + \frac{\Lambda_i (\Lambda_0 - \Lambda_i)}{\Lambda_0} + \frac{\Lambda_i (\Lambda_0 - \Lambda_i)}{\Lambda_0^2} e^{-\Lambda_0 t}$$

растет приблизительно линейно со временем /при $\Lambda_0 t \gg 1$ /.

Накопление ионов из непрерывной струи газа подробно рассмотрено в ^{14/}. Поэтому здесь мы лишь приведем ряд графиков, характе-

ризирующих накопление ионов N , Ar и Xe в кольце. Сечения ионизации для Ar и Xe ввиду отсутствия экспериментальных данных вычислялись по формуле /9/; для N , как и в предыдущем разделе, вводился тот же нормировочный коэффициент.

На рис. 1-3 приведены кривые накопления ионов N , Ar и Xe для скорости потока газа $u_a = 4,8 \cdot 10^4$ см/сек. Выход кривых /кроме кривой n_z/n_a / на плато характерен для непрерывного пучка атомов при выполнении условия $\Lambda_k t \gg 1$. Плотность ионов в равновесии дается формулой

$$f_k = \frac{n_k}{n_a} = \frac{\Lambda_a}{\Lambda_0} \frac{\sigma_0}{\sigma_k}, \quad /13/$$

и растет с ростом скорости потока газа u_a , стремясь в пределе к величине $\frac{\sigma_0}{\sigma_k}$.

Основным недостатком непрерывного напуска газа является то, что кроме ионов требуемой зарядности в кольце накапливаются и ионы всех низших зарядностей. Это крайне нежелательно, так как суммарная плотность ионов в кольце ограничена допустимыми потерями электронов кольца при рассеянии их на ионах. По оценкам /4/ для Xe , например, $f \leq 10^{-3}$. Чтобы избежать накопления в кольце ионов с зарядами ниже требуемого, в данной работе предлагается использовать импульсную струю газа.

2.2. Импульсный напуск газа

Предположим, что в момент времени $t = 0$, когда кольцо уже сформировано, его начинает пересекать струя газа и напуск газа длится в течение времени T . После этого напуск газа прекращается и в результате последующей ионизации накопившиеся за время T ионы переходят в более высокие зарядности.

В случае импульсной струи газа $\theta(t) = 1$ при $t \leq T$ и $\theta(t) = 0$ при $t > T$. Решение системы /10/ в этом случае обозначим

$g_k(t) = \frac{n_k(t)}{n_a}$. Тогда при $t \leq T$, $g_k(t) = f_k(t)$ и, обозначив $f_k(T) = x_k$, для $t > T$ имеем

$$g_k(t) = \sum_{n=0}^k C_{kn} e^{-\Lambda_n t}, \quad /14/$$

где

$$C_{00} = x_0 e^{\Lambda_0 T},$$

$$C_{nn} = \left[x_n + \sum_{m=0}^{n-1} x_m \prod_{\ell=m}^{n-1} \frac{\Lambda_\ell}{(\Lambda_\ell - \Lambda_n)} \right] e^{\Lambda_n T},$$

$$C_{kn} = \frac{\prod_{m=n}^k \Lambda_m}{\prod_{\ell=n+1}^k (\Lambda_\ell - \Lambda_n)} C_{nn}.$$

Для суммарной плотности тяжелых частиц получаем

$$g(t) = \frac{\sum_{k=0}^Z n_k}{n_a} = \begin{cases} f(t), & t \leq T \\ \sum_{k=0}^Z x_k = \text{const}, & t > T. \end{cases} \quad /15/$$

Таким образом, в случае импульсного напуска газа суммарная плотность тяжелых частиц в кольце постоянна при $t > T$ и равна $f(T)$. Результаты расчетов по накоплению ионов N , Ar и Xe из импульсной струи газа приведены на рис. 4-7. В отличие от предыдущего случая у кривых накопления k -кратно ионизованных атомов ($k < Z$) существуют максимумы, причем амплитуды максимумов растут с ростом скорости струи газа.

Выбирая соответствующим образом время накопления, можно получить в кольце, в основном, ионы требуемого заряда.

На рис. 8 показана зависимость кривых накопления от времени инжекции T . С ростом T максимумы становятся менее острыми /"размазываются"/, но при этом их амплитуда может несколько расти, если для данного k $\Lambda_k T < 1$. При выборе T нужно исходить из следующего: T не должно быть слишком велико, чтобы кривые накопления имели достаточно острые и хорошо разделенные максимумы /в этом случае в кольце будут, в основном, ионы одного заряда/, а также чтобы суммарное число ионов в кольце не превышало допустимой величины /суммарное число ионов можно регулировать и давлением в струе газа, при этом вид кривых накопления не меняется/. Но с другой стороны, T должно быть больше характерного времени ионизации нейтрального атома $\tau_0 = \Lambda_i^{-1}$, чтобы в кольце успело образоваться заметное количество ионов.

Кроме этого нижняя граница T будет ограничена конструктивными возможностями. По-видимому, наиболее приемлемым является время $T \approx 10^{-5}$ сёк.

Проведенный анализ показывает возможность накопления в кольце ионов азота, аргона и ксенона требуемого заряда и концентрации из импульсной струи газа. Использование импульсного напуска газа облегчает получение и поддержание в камере адгезатора необходимого вакуума.

В ряде советских и зарубежных работ описаны установки, позволяющие получать импульсные пучки нейтральных атомов высокой плотности.

Например, в^{/10/}сообщается о получении сгустков нейтральных атомов водорода с плотностью $n_a \approx 3 \cdot 10^{12}$ см⁻³ скорости которых практически параллельны и составляют $\approx 10^8$ см/сек. Длительность импульса по времени лежит в пределах 50-80 мксек.

В другой работе^{/11/}были получены короткие ($T_i \approx 10^{-5}$) сек пучки атомов нейтрального ксенона со скоростями $u_a \approx 2-5 \cdot 10^6$ см/сек и полным числом атомов $N_a \approx 10^{15}$.

Используя какую-либо из этих методик в сочетании с формирующим устройством в виде кольцевых щелей, можно получить газовую струю с нужными для нас параметрами. Следует отметить дополнительно, что хотя ни в одной из упомянутых работ не приводятся данные о степени возбуждения атомов в струе, из простых физических соображений очевидно, что значительная доля атомов инжектируемого газа должна находиться в высоковозбужденных состояниях. Время первой ионизации таких атомов существенно меньше времен ионизации, рассматриваемых нами, т.е. они легче ионизируются и захватываются электронным кольцом.

Литература

1. В.И. Векслер, В.П. Саранцев и др. Атомная энергия, 24, 317, 1968; Препринт ОИЯИ, Р9-3440-2, Дубна, 1967.
2. H. Levy. Symposium on Electron Ring Accelerators, Berkeley, 1968, p. 318.
3. М.Л. Иовнович, Н.Б. Рубин, В.П. Саранцев. Атомная энергия, 4, 301, 1969; Препринт ОИЯИ, Р9-4257, Дубна, 1969.
4. М.Л. Иовнович, М.М. Фикс. Атомная энергия, 6, 429, 1970; Препринт ОИЯИ, Р9-4849, Дубна, 1969.

5. И.Н.Иванов и др. Препринт ОИЯИ, Р9-4132, Дубна, 1968 .
6. Ю.С.Дерендяев и др. Препринт ОИЯИ, Р9-6003, Дубна, 1971.
7. M. Gruzinski. *Phys. Rev.*, 138, A336 (1965).
8. Физико-химические свойства элементов. Справочник. Под редакцией Г.В. Самсонова, Киев, Наукова Думка, 1965.
9. L.J. Laslett. *Symposium on Electron Ring Accelerators, Berkeley*, 1968, p. 273.
10. К.Б. Карташев и др. *ЖЭТФ*, 59, 779, 1970; *Plasma Phys. and Controlled Nucl. Fusion Res.*, 2, 335, 1969 .
11. PER GLOERSEN, *Phys. Fluids*, 12, 945, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июня 1972 года.

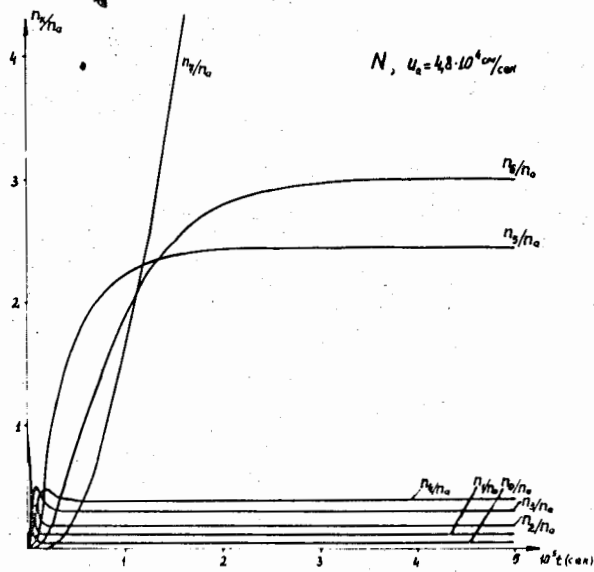


Рис. 1. Накопление ионов атомарного азота в кольце из непрерывной струи газа.

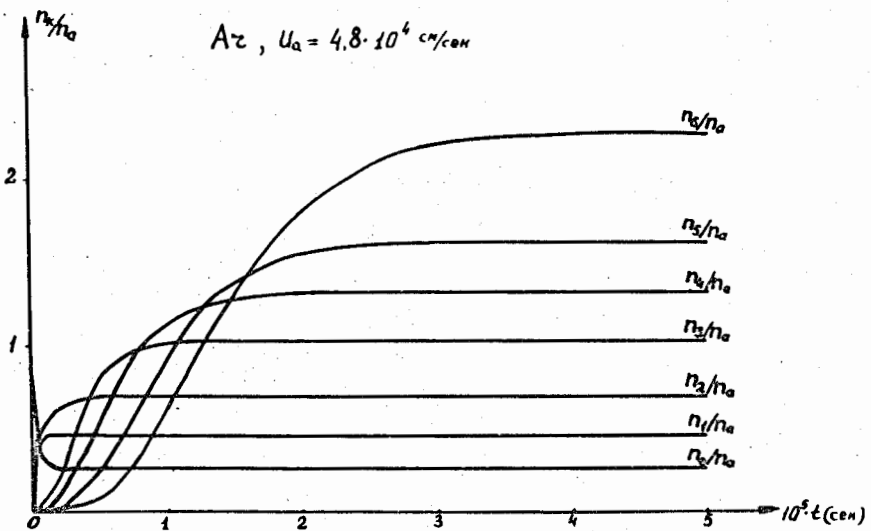


Рис. 2. Накопление ионов аргона в кольце из непрерывной струи газа.

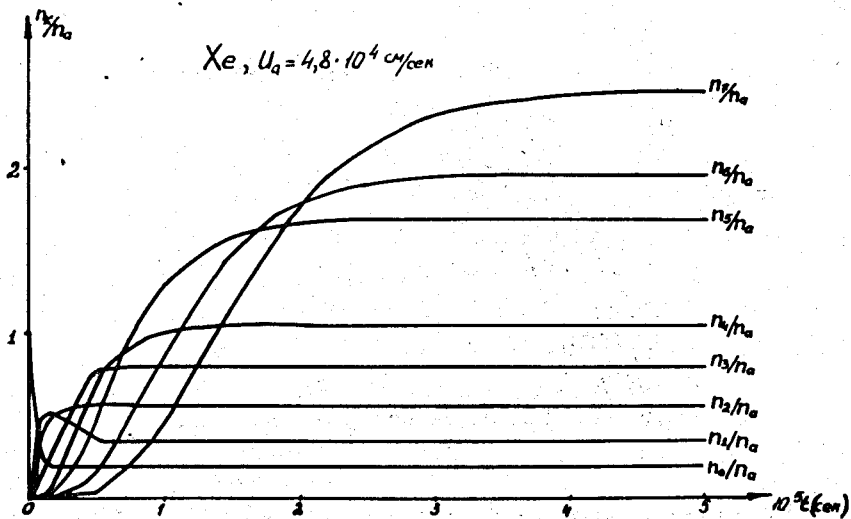


Рис. 3. Накопление ионов ксенона в кольце из непрерывной струи газа.

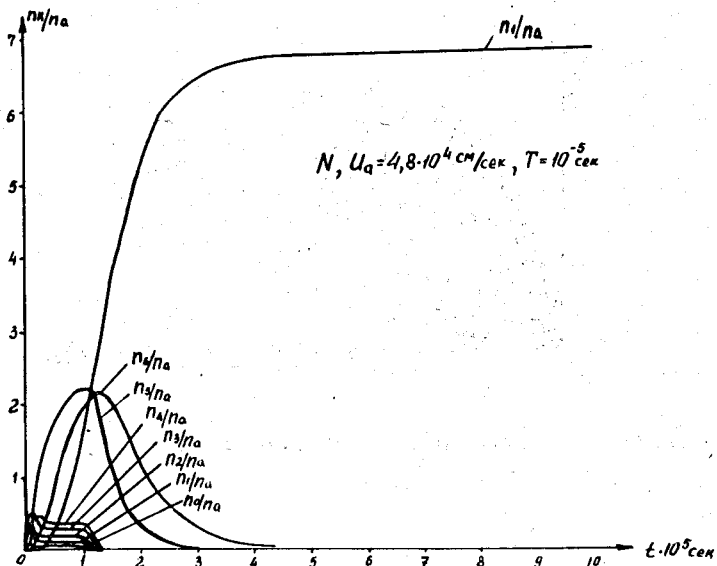


Рис. 4. Накопление ионов азота в кольце из импульсной струи газа.

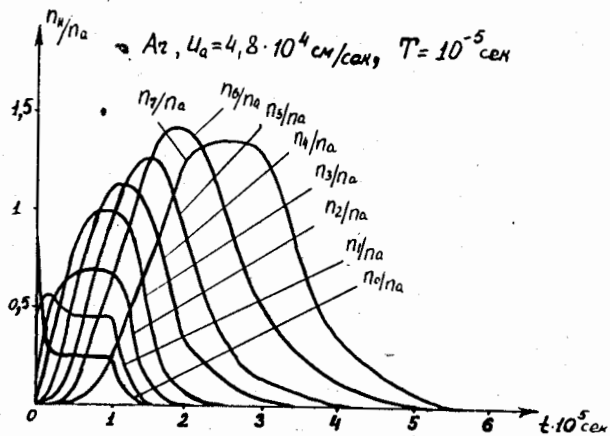


Рис. 5. Накопление ионов аргона в кольце из импульсной струи газа.

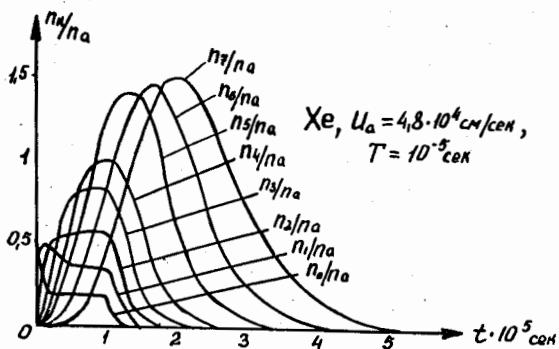


Рис. 6. Накопление ионов ксенона в кольце из импульсной струи газа.

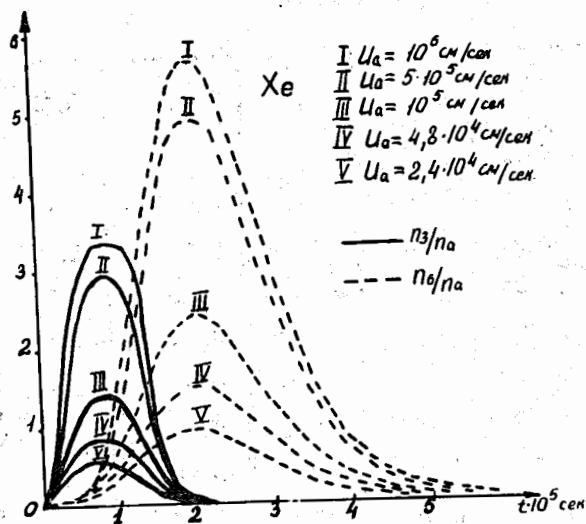


Рис. 7. Накопление ионов ксенона в кольце при разных скоростях импульсной струи газа.

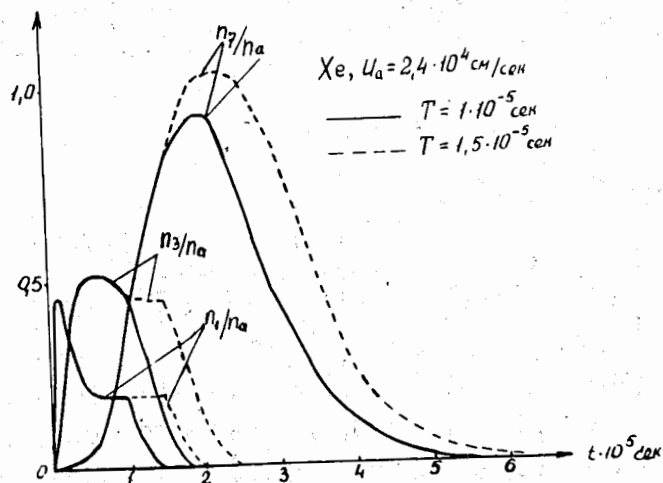


Рис. 8. Накопление ионов ксенона в кольце при разных длительностях времени инъекции.

Таблица 1. Гелий

Давление P (мм.рт.ст.)	\bar{g}_f (мм)	\bar{b}_f (мм)	V_{zf}^2	V_{zf}^2	$N_1/10^{10}$	$N_2/10^{10}$	$(N_1+N_2)/10^{10}$
0	1,826	1,627	0,9417	0,04646	0	0	0
$1 \cdot 10^{-7}$	1,816	1,462	0,9622	0,07119	1,672	0,6267	2,299
$2 \cdot 10^{-7}$	1,805	1,327	0,9856	0,1049	3,215	1,359	4,574
$3 \cdot 10^{-7}$	1,794	1,218	1,012	0,1480	4,642	2,188	6,830
$4 \cdot 10^{-7}$	1,781	1,129	1,040	0,2004	5,971	3,101	9,072
$5 \cdot 10^{-7}$	1,768	1,056	1,071	0,2615	7,215	4,087	11,30
$6 \cdot 10^{-7}$	1,775	0,9956	1,104	0,3313	8,385	5,136	13,52
$7 \cdot 10^{-7}$	1,741	0,9443	1,140	0,4093	9,489	6,244	15,73
$8 \cdot 10^{-7}$	1,727	0,9003	1,177	0,4955	10,53	7,405	17,94
$9 \cdot 10^{-7}$	1,713	0,8619	1,217	0,5897	11,52	8,614	20,13
$1 \cdot 10^{-6}$	1,700	0,8348	1,253	0,6702	12,64	9,717	22,36

Таблица 2. Азот

P (мм.рт.ст.)	\bar{g}_f (мм)	\bar{b}_f (мм)	V_{zf}^2	V_{zf}^2	$N_1/10^{10}$	$N_2/10^{10}$	$N_3/10^{10}$	$N_4/10^9$	$N_5/10^8$
$5 \cdot 10^{-8}$	1,775	1,099	1,054	0,2230	1,832	2,571	1,601	4,077	6,603
$4 \cdot 10^{-8}$	1,787	1,167	1,028	0,1757	1,549	2,085	1,226	2,950	4,499
$3 \cdot 10^{-8}$	1,798	1,256	1,002	0,1307	1,264	1,589	0,854	1,877	2,603
$2 \cdot 10^{-8}$	1,808	1,360	0,9791	0,09513	0,9139	1,070	0,5255	1,056	1,333
$1 \cdot 10^{-8}$	1,818	1,485	0,959	0,06696	0,5012	0,5375	0,2368	0,4276	0,4827