

УДК 621.364.634.3

Эффекты пространственного заряда в интенсивных электронных пучках в методе электронного охлаждения

Ю. В. Коротаев, И. Н. Мешков, А. Л. Петров, А. О. Сидорин,
А. В. Смирнов, Е. М. Сыресин
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Представлены результаты совместной работы в рамках сотрудничества между ОИЯИ (Дубна, Россия) – ЦЕРН (Женева, Швейцария) – ИТЭФ (Москва, Россия) в 1994–1995 гг. и дальнейших исследований в области физики электронного охлаждения, проведенных в ОИЯИ в 1996–1998 гг. Цель данных теоретических и экспериментальных исследований – изучение возможности нейтрализации пространственного заряда интенсивного электронного пучка в условиях ультравысокого вакуума и формирования стабильного нейтрализованного электронного пучка в токах состояния.

Влияние пространственного заряда электронного пучка и его нейтрализация

Пространственный заряд электронного пучка в методе электронного охлаждения приводит к появлению разброса энергии электронов и зависимости продольной скорости электронов от поперечной координаты. Им же обусловлено возникновение дрейфа электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях пучка и продольном магнитном поле. Разброс продольной скорости электронов определяется изменением потенциала пространственного заряда поперек пучка:

$$\frac{\Delta\beta(r)}{\beta} \approx \frac{(1-\eta)}{\beta^2\gamma^3} \frac{eU(r)}{mc^2} < 0 \Rightarrow \frac{\Delta v(r)}{v_0} \approx \frac{(1-\eta)eU(r)}{2E_0} < 0, \text{ если } \beta \ll 1,$$

где $\beta = v_0/c$, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$;

r – цилиндрическая координата относительно оси пучка;

E_0 – кинетическая энергия электронов;

η – степень нейтрализации пучка

$$\eta = \frac{n_i}{n_b},$$

n_i – плотность ионов, накапливаемых в электронном пучке с плотностью n_b ;

$U(r)$ – потенциал электрического поля пучка в отсутствие ионов

$$U(r) = \frac{eI}{\beta} \times \begin{cases} 1 - (r/a)^2 + 2 \ln(b/a), & 0 < r < a \\ 2 \ln(b/r), & a < r < b. \end{cases}$$

Можно привести формулу, удобную для практических вычислений:

$$U = \frac{30I}{\beta}, \quad E(r) = \frac{60I}{\beta} \left(\frac{r}{a^2} \right),$$

где I – ток пучка, А;

a – радиус пучка, м;

b – радиус камеры, м;

U — разность потенциалов между осью и краем пучка, В;
 $E(r)$ — электрическое поле пространственного заряда пучка при постоянной по его сечению плотности электронов, В/м.

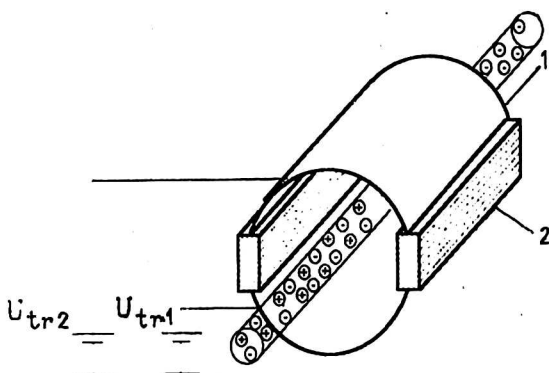
Скорость дрейфа электронов в скрещенных полях электронного пучка E_r , B_θ и продольном магнитном поле B системы определяется как:

$$\frac{v_d}{v_0} = (1 - \eta\gamma^2) \frac{2I}{\gamma^2 \beta^2} \frac{r}{a^2 B c} = (1 - \eta\gamma^2) \frac{2 \cdot 10^{-5} I}{\gamma^2 \beta^2} \frac{r}{a^2 B}$$

Нейтрализация пространственного заряда электронного пучка

Нейтрализация пространственного заряда электронного пучка может быть осуществлена при накоплении ионов, образуемых при столкновении электронов пучка с молекулами остаточного газа. Накопление ионов в пучке осуществляется с помощью двух специальных электростатических ловушек — “пробок” (рис. 1). Одна пробка устанавливается на выходе электронной пушки, другая — на входе в электронный коллектор.

Рис. 1. Электростатическая пробка:
 1 — электроды пробки (металлические полуцилиндры), к которым прикладываются положительные и различные по значению потенциалы U_1 и U_2 ;
 2 — проводящие высокоомные стекла



Пробки отражают ионы, предотвращая их уход вдоль оси пучка. Электрическое поле не позволяет уходить на стенки камеры поперек пучка, что приводит к запиранию ионов внутри пучка. Ионизационные электроны очищаются поперечным полем пробок.

Время нейтрализации может быть рассчитано по формуле:

$$\tau_n = (Z\sigma n_0 v_0)^{-1},$$

где Z — заряд ионов;
 σ — сечение ионизации;
 n_0 — плотность остаточного газа;
 v_0 — скорость электрона.

Возможны два режима существования нейтрализованного электронного пучка, зависящие от вакуумных условий (рис. 2):

- 1-й режим — низкий вакуум и, соответственно, холодные ионы;
- 2-й режим — высокий вакуум — горячие ионы.

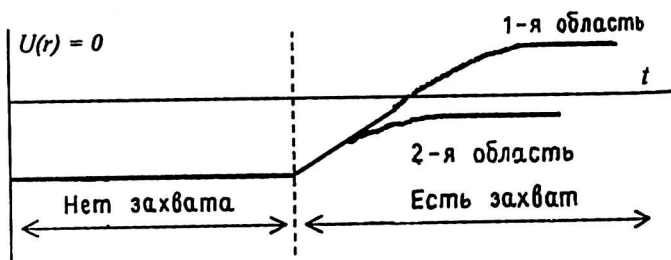


Рис. 2. Два режима процесса нейтрализации

Для 1-го режима генерация ионов достаточно высока, что приводит к перекомпенсации пространственного заряда пучка (пучок положительно "заряжен") и выталкиванию ионов из пучка. Для 2-го режима имеет место дефицит ионов, пучок заряжен отрицательно, и ионы не покидают пучок до тех пор, пока их температура не превысит разность потенциалов между границей пучка и стенкой камеры.

Устойчивость замагниченного и нейтрализованного электронного пучка

Когерентные колебания двухкомпонентной системы, состоящей из электронного пучка и накопленных ионов, описываются следующими уравнениями [1]:

$$\frac{d^2 \xi_i}{dt^2} + (i\omega_B + 2\gamma) \frac{d\xi_i}{dt} + \omega_i^2 (\xi_i - \xi_e) = 0;$$

$$\frac{d\xi_e}{dt} = \eta\omega_d (\xi_e - \xi_i), \quad \omega_B = \frac{ZeB}{M}, \quad \omega_i^2 = \frac{Ze^2 n_e}{2\epsilon_0 M}, \quad (1)$$

где $\omega_d = Zen_e/2\epsilon_0 B$ — частота ионного дрейфа в электрическом поле электронного пучка и продольном магнитном поле;

γ — коэффициент затухания Ландау, обусловленный нелинейностью колебаний иона.

Решение уравнений (1), полученных в рамках линейной теории, имеет вид бегущих волн

$$\xi_{e,i}(z, t) = A_{e,i} e^{i(kz - \omega t)}.$$

Частота когерентных колебаний (когда столб ионов осциллирует в электрическом поле замагниченного электронного пучка) описывается соотношением, которое следует из (1):

$$\omega_{1,2,3,4} = \pm \frac{\omega_B}{2} \pm \sqrt{\frac{\omega_B^2}{4} + \omega_i^2}.$$

Она не зависит от степени нейтрализации. Амплитуда колебаний нарастает для частоты ω_1 , равной

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{\omega_B^2}{4} + \omega_i^2} - \frac{\omega_B}{2}. \quad (2)$$

Коэффициент усиления амплитуды волны на длине нейтрализованного пучка L равен

$$K = e^{k^* L}$$

где k^* — параметр, определяемый коэффициентом затухания Ландау γ .

Существенно, что $k^* \propto \eta$. Усилие происходит для поперечных волн, имеющих круговую поляризацию, направление вращения которой совпадает с направлением электронного пучка.

Развитие неустойчивости нейтрализованного пучка существенно зависит от обратной связи в системе. Коэффициент обратной связи может быть опре-

делен как модуль отношения значений электрического поля волны на входе в систему и на выходе из нее:

$$\chi = \left| \frac{E_{e \max}(z=0)}{E_{e \max}(z=L)} \right|.$$

Пучок стабилен (амплитуда колебаний не возрастает во времени), если $\chi K < 1$.

Пороговая плотность тока пучка для так называемой пучково-дрейфовой неустойчивости может быть в таком подходе в виде

$$j_{th} = \frac{v_0^2 B}{ckL}, \quad (3)$$

где k — численный коэффициент порядка 1, зависящий от степени нейтрализации пучка и коэффициента усиления амплитуды волны $k \propto \eta / \ln K$.

Обратная связь может быть обеспечена:

быстрыми электронами, осциллирующими между пушкой и коллектором;
продольным движением накопленных ионов;
продольными волнами.

Величина χ достаточно неопределенна.

Когда пучок частично нейтрализован, ионы совершают также и некогерентные колебания в поперечном направлении под влиянием электрического поля пучка и продольного магнитного поля.

Частота некогерентных колебаний равна:

$$\omega_{1,2} = \sqrt{\omega_i^2(1-\eta) + \frac{\omega_L^2}{4}} \pm \frac{\omega_L}{2}. \quad (4)$$

Некогерентные ионные колебания являются источником затухания когерентных колебаний (затухание Ландау), когда некогерентные колебания становятся нелинейными.

Зависимость степени нейтрализации стационарного нейтрализованного пучка от параметров можно описать полуэмпирической формулой:

$$\eta \cong \frac{1}{1 + \frac{j_b L}{\Lambda v_0^2 B}},$$

где j_b — плотность тока пучка;

L — длина нейтрализованного пучка;

v_0 — скорость электрона;

B — магнитное поле;

$\Lambda \cong 1 \div 2$ — численный коэффициент, логарифмически зависящий от давления.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные установки

Изучение нейтрализованного электронного пучка было проведено на установке электронного охлаждения накопителя антипротонов LEAR (CERN, Швейцария) и на стенде электронного охлаждения (ОИЯИ, Россия) (рис. 3, 4 и табл. 1).

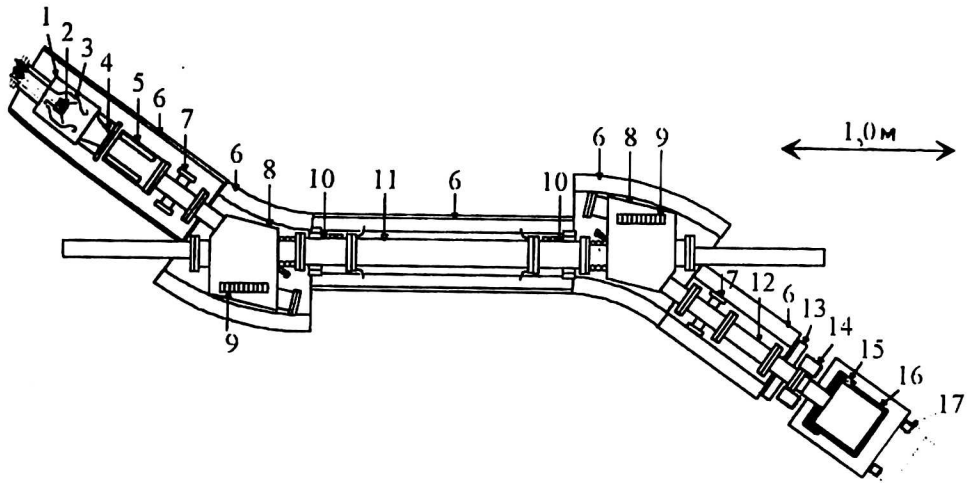


Рис. 3. Схема установки электронного охлаждения LEAR:

1 – электронная пушка; 2 – катод; 3 – управляющий электрод; 4 – анод; 5, 9 – NEG насосы; 6 – соленоид; 7 – электростатическая пробка; 8 – торроидальная камера; 10 – пикап-станция; 11, 12 – дрейфовые камеры; 13 – вакуумный шибер; 14, 17 – коллекторные катушки; 15 – репеллер; 16 – коллектор

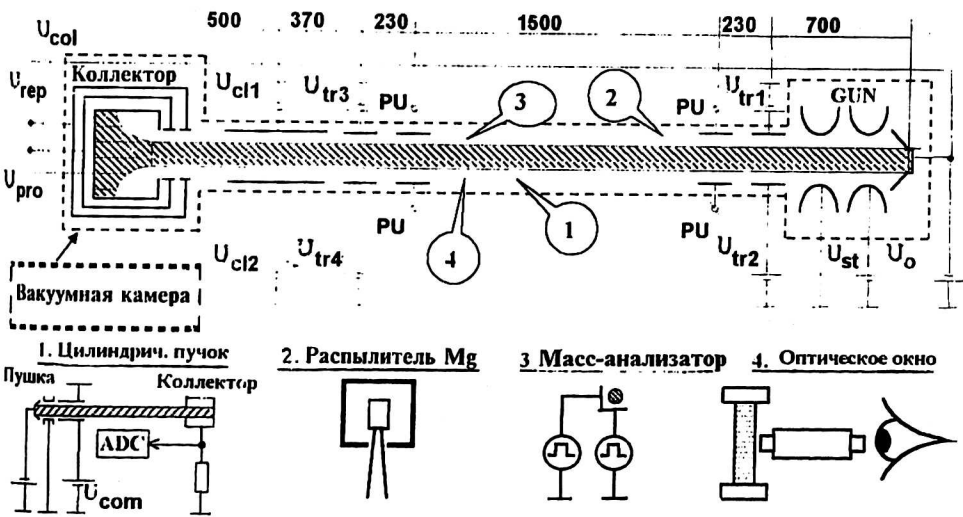


Рис. 4. Схема экспериментального стенда ОИЯИ (размеры в мм)

Таблица 1

ТИПИЧНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕЙТРАЛИЗОВАННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Параметры	LEAR (Швейцария)			ОИЯИ (Россия)
Энергия электронов, кэВ	27,5	11,5	3,2	2,5–25
Ток пучка, А	1,5	0,5	0,12	0,4–1,5
Диаметр пучка, см	5			3

Окончание табл. 1.

Параметры	LEAR (Швейцария)			ОИЯИ (Россия)
	Перванс пучка, $\mu\text{A}/\text{В}^{3/2}$	0,32	0,4	0,66
Магнитное поле, Гс	600			400–500
Вакуум, 10^{-10} торр	1,0–3,0			10–1000
Степень нейтрали- зации	0,9	0,85	0,75	0,7–0,9

Для регулирования давления использовались микронатекатель и испаритель магния (“магниева струя”, см. поз. 2, рис. 4). Спектр свечения атомов остаточного газа, возбуждаемых электрическим ударом, анализировался оптическим спектрометром и набором счетофильтров (см. поз. 4, рис. 4).

Диагностика пространственного заряда

Для диагностики пространственного заряда нейтрализованного электронного пучка использовались три метода:

1. Метод диагностического электронного пучка (см. рис. 4, поз. 1).
2. Времяпролетный метод.
3. Использование охлаждаемого (анти)протонного пучка.

1. В первом методе диагностический пучок распространяется параллельно основному пучку, при этом измеряется его азимутальное смещение в скрещенных электрическом поле основного пучка и магнитном поле соленоидов. Применение дополнительного компенсирующего электрического поля внешних электродов (нуль-метод) позволяет измерить абсолютное значение электрического поля основного пучка:

$$E_b = E_{C_0}(I_{C_0}/I_0),$$

где E_{C_0} , I_{C_0} – напряженность и протяженность компенсационного электрического поля; I_0 – протяженность основного пучка.

2. Измеряя скорость электронов, которая зависит от величины потенциала пространственного заряда пучка, можно определить η . Для этого продольная скорость электронов пучка модулируется с частотой $\omega_{\text{mod}} (\sim 200 \text{ МГц})$, что осуществляется гармоническим напряжением $U_m(t) = U_m \cos(\omega t)$, приложенным к электродам пикап-станции (PU), ближайшей к электронной пушке. Измерение сигнала модуляции плотности следующими пикап-электродами, расположенными по ходу пучка, и последующий корреляционный анализ позволяют получить сдвиг фазы $\Delta\varphi$ между возбужденным и измеряемым сигналами, а по нему – величину коэффициента нейтрализации η из соотношения:

$$\Delta\varphi = \frac{\omega L}{v_0(\eta)}.$$

В ходе экспериментов использовались методы измерения: сравнение значений $\Delta\varphi$ в случаях, когда пробки нейтрализации включены или выключены;

измерение зависимости $\Delta\varphi$ от тока пучка;

изменение потенциала катода электронной пушки, что позволяет определить абсолютное значение потенциала пучка.

Первый и второй методы диагностики позволяют получить интегральное значение степени нейтрализации, усредненное по поперечному размеру пучка и по продольной координате.

3. Использование охлаждаемого ионного пучка и метода так называемой Шоттки-диагностики для измерения скорости протонов, циркулирующих в накопителе (анти)протонов LEAR, позволяет найти локальное значение степени нейтрализации охлажденного ионного пучка в области, где (анти)протонный пучок проходит через электронный. Существенно, что имеет место равенство $v_p(x_p) = v_e(x_i)$ при охлаждении протонов электронами. Поэтому, измеряя скорость v_p , можно определить локальное значение v_e и соответственно $\eta(r)$. Можно также использовать Шоттки-сигнал как нуль-индикатор, меняя потенциал катода пушки при смещении ионного пучка.

Стационарный режим нейтрализованного электронного пучка

Для этого режима характерны следующие особенности:

степень нейтрализации η достигает насыщения при увеличении потенциала пробки (рис. 5);

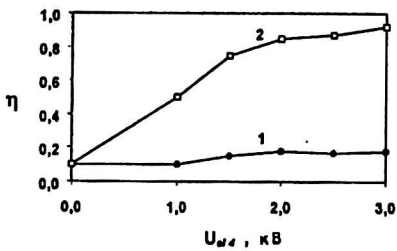


Рис. 5. Зависимость $\eta(U_{пр})$ на стенде ОИЯИ:
 $E_e = 6$ кэВ; $I_e = 0,5$ А;
 $P = 100$ нторр; 1 - одна пробка
 включена: $U_{e11} = U_{e12} = 0$;
 $U_{e13} = 1/4 U_{e14}$;
 2 - две пробки включены:
 $U_{e11} = U_{e13} = 1/4 U_{e12} = 1/4 U_{e14}$

степень нейтрализации η слабо зависит от тока пучка, когда пучок устойчив (область $I_b < 2$ А на рис. 6);

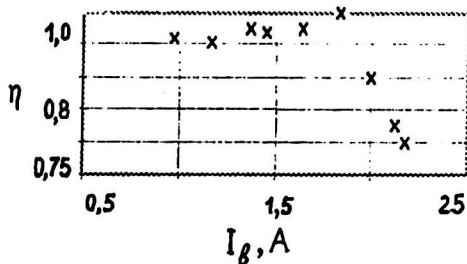


Рис. 6. Зависимость $\eta(I_b)$ на LEAR;
 $E_e = 27,5$ кэВ

степень нейтрализации η увеличивается с ростом магнитного поля (рис. 7);

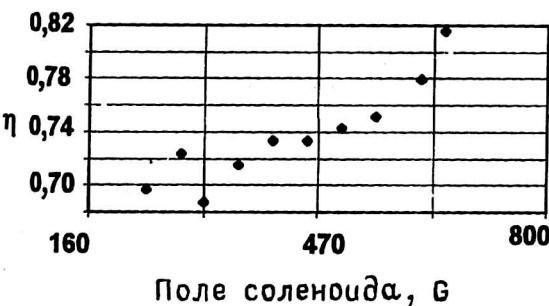


Рис. 7. Зависимость степени
 нейтрализации от магнитного
 поля (LEAR):
 $E_e = 12,5$ кэВ; $I_b = 0,37$ А;
 $B(G) = 1,57 I_c (A)$

η зависит от вакуума — уменьшается при достижении давления $P < 3 \cdot 10^{-8}$ торр (рис. 8). Этот эффект наблюдался также в экспериментах, проведенных в ИЯФ им. Г. И. Будкера [3];

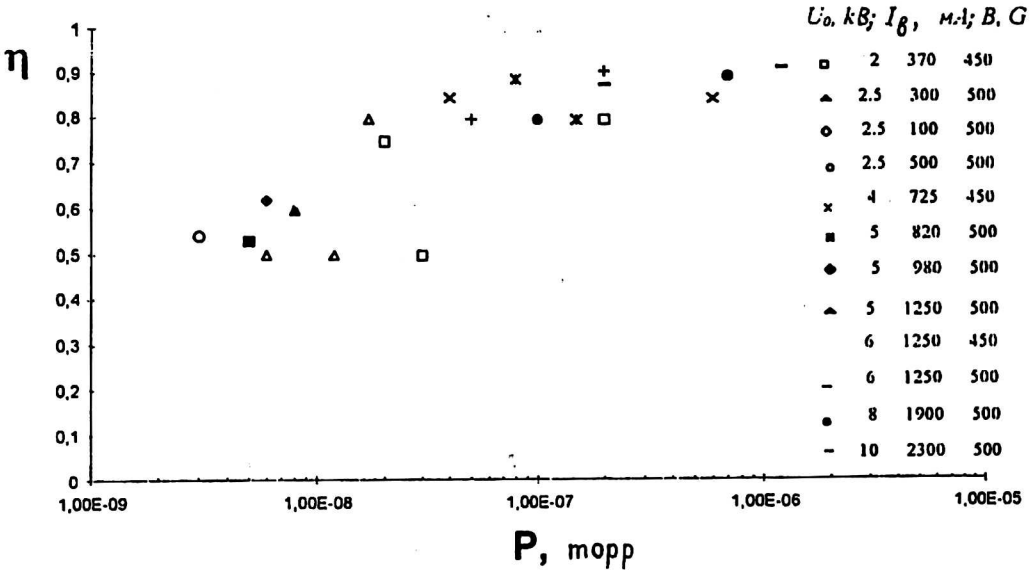
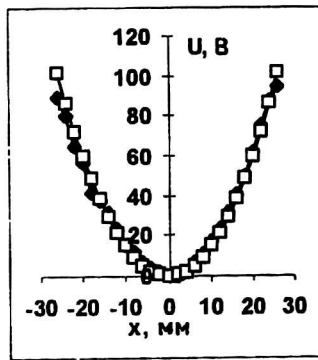


Рис. 8. Зависимость степени нейтрализации η от давления на стенде ОИЯИ

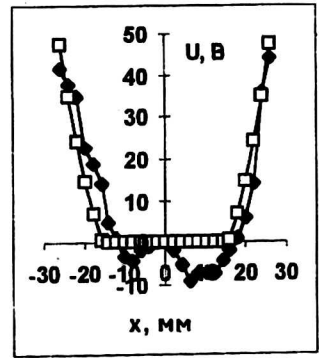
при нейтрализации электронного пучка потенциал его пространственного заряда существенно снижается (рис. 9).

Рис. 9. Распределение потенциала электронного пучка в зависимости от радиуса:

- а — пробки выключены;
- б — пробки включены;
- — расчет;
- ◆ — эксперимент;
- $E_e = 27$ кэВ;
- $I_b = 1$ А



а



б

Волновые явления и неустойчивость пучка

Нейтрализованный электронный пучок становится неустойчивым, когда величина тока пучка достигает порогового значения. Это наблюдалось с помощью времяпролетного метода (рис. 10) и метода диагностического пучка.

Развитие неустойчивости пучка может наблюдаться при измерении сигнала с дифференциальных PU -электродов (рис. 11). Частота колебаний соответствует формуле (2).

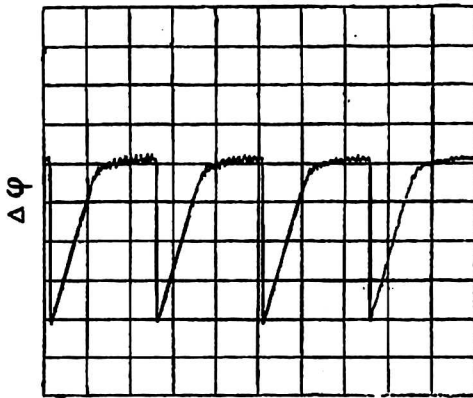


Рис. 10. Зависимость степени нейтрализации от времени на LEAR (времяпролетный метод)

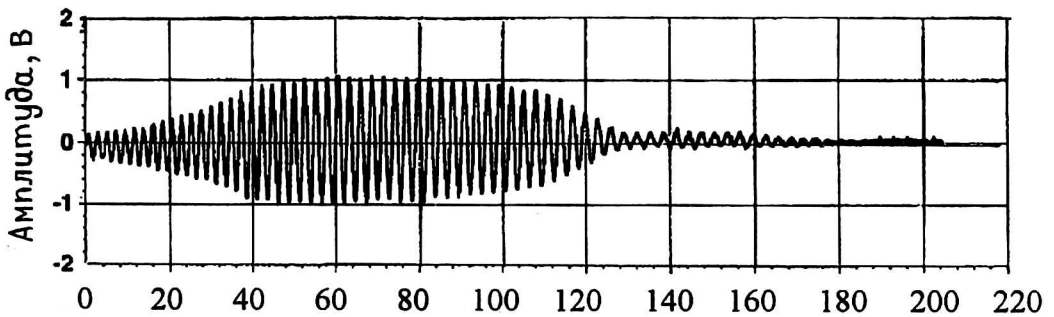


Рис. 11. Поперечные колебания в пучке во время развития неустойчивости дрейфового пучка

Подавление неустойчивости порогового тока

Было разработано четыре активных метода подавления пучководрейфовой неустойчивости:

поперечный нагрев ионов с помощью поперечного электрического поля, гармонически изменяющегося во времени (“шейкер”);

увеличение продольной температуры ионов;

очистка вторичных электронов из пучка специальными чистящими электродами;

очистка вторичных электронов из пучка с применением пушки с “чистящими анодами”.

Эффект ионного поперечного нагрева демонстрирует рис. 12. Когда пробки и шейкер выключены (область 1), естественная нейтрализация вызывает неустойчивость пучка. Пучок становится стабильным, если шейкер включен (область 2). Пробки здесь выключены, и шейкер “вычищает” ионы из пучка вследствие их быстрого нагрева. Включение пробок (область 3) увеличивает нейтрализацию. Пучок остается устойчивым, пока включен шейкер. Выключение шейкера (область 4) делает пучок неустойчивым. Формула (4) хорошо описывает оптимальное значение частоты шейкера.

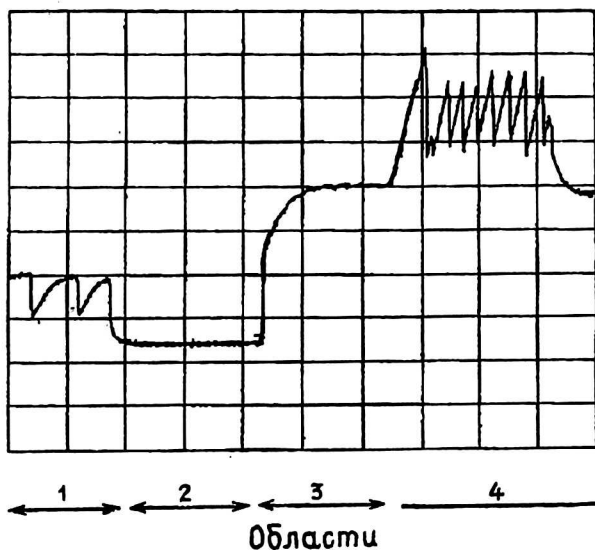
Нагрев ионов в продольном направлении изучался на стенде ОИЯИ. Эксперименты показали, что стабильность нейтрализованного электронного пучка может быть достигнута, когда потенциал управляющего электрода пушки

модулируется с частотой, соответствующей скорости продольной волны V_{phase} , распространяющейся в нейтрализованном электронном пучке:

$$f_{res} = \frac{V_{phase}}{L} = \frac{\omega_{pl}}{2} \left(1 + 2 \ln \frac{b}{a}\right)^{1/2}.$$

Здесь $\omega_{pl} = \sqrt{4\pi n_i 2e/M_i}$; $n_i = \eta n_b$; a, b — радиусы электронного пучка и вакуумной камеры.

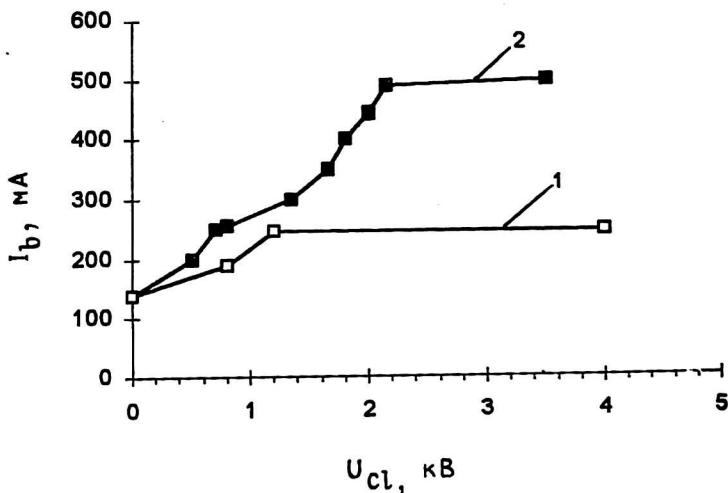
Рис. 12. Сигнал TOF при различных НЭП режимах (ECOOL)



Очистка вторичных электронов из пучка специальными чистящими электродами, помещенными в дрейфовую камеру или в пушку, существенно увеличивает порог неустойчивости электронного пучка (рис. 13). Управляющий электрод пушки аналогичен по конструкции электродам нейтрализации.

Рис. 13. Зависимость порогового тока от чистящего напряжения (стенд ОИЯИ):

- 1 — чистящие электроды;
- 2 — пушка с чистящим анодом; $U_0 = 2,5$ кВ;
- $P = 4-10$ нторр



Пороговый ток развития неустойчивости значительно возрастает при использовании активных методов ее подавления (рис. 14). Можно сделать вывод, что стабильность нейтрализованного электронного пучка ограничена некоторыми эффектами, и наибольшее влияние оказывают вторичные элект-

троны. Применение чистящих электродов в электронной пушке стабилизирует пучок и в отсутствии ионного нагрева, что позволяет избежать снижения степени нейтрализации.

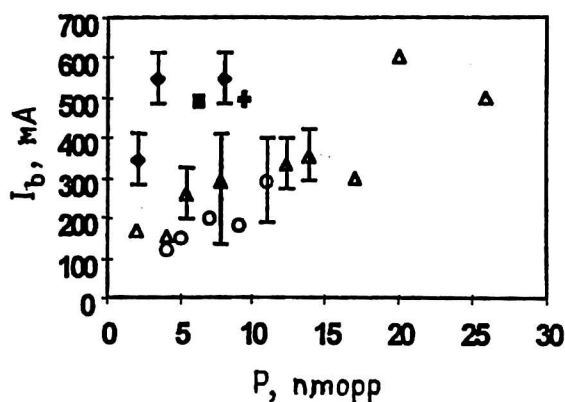


Рис. 14. Зависимость порогового тока от давления остаточного газа на стенде ОИЯИ:

- – пробки включены;
- △ – пробки и чистящие электроды включены;
- – пробки и чистящий электрод пушки;
- ♦ – пробки, чистящие электроды и шейкер;
- + – пробки, чистящие электроды и нагрев продольной компоненты энергии

Последние эксперименты, проведенные с использованием специального ионного масс-спектрометра, указывают на наличие зависимости порога устойчивости нейтрализованного пучка от массового состава ионов, накапливаемых в пучке.

Таким образом, формула порогового тока нейтрализованного электронного пучка (3) была получена впервые авторами работы [4]. Позже эти данные были более детально исследованы в других экспериментах [2, 3], в том числе и в представленных в данной публикации. Результаты всех этих работ отличаются, главным образом, значением коэффициента k в (3) (табл. 2). Это различие в значительной мере обусловлено вакуумными условиями каждого из обсуждаемых экспериментов, а также поперечными размерами нейтрализованных электронных пучков в этих экспериментах.

Таблица 2

ДАННЫЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ В РАЗЛИЧНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Авторы	Экспериментальная установка	k -фактор
М. Незлин и др. [4]	Экспериментальный стенд	8
В. Пархомчук и др. [2]	Система электронного охлаждения накопителя НАП-М	2
В. Пархомчук и др. [3]	Экспериментальный стенд	4
Данная работа		
Пассивный режим	Система электронного охлаждения LEAR	25–35
Пассивный режим	Стенд ОИЯИ	5–15
Активный режим	Система электронного охлаждения LEAR	10
Активный режим	Стенд ОИЯИ	2,5

Литература

1. Нейтрализация пространственного заряда в электронном пучке: Отчет CERN-PS/JINR/ITER 1994–1995. Коллаборация. Мешков И., Moehl D., Сыресин Е., Tranquille. G. PS/DI/Note 98-16, ЦЕРН, Женева, 1998.
2. Куделайнен В., Пархомчук В., Пестриков Д./Сов. ЖЭТФ. 1983. № 53. – 870 с.

3. Буров А., Куделайнен В., Лебедев В., Пархомчук В., Серый А., Шильцев В.: Препринт ИЯФ 89-116. Новосибирск, 1989/Перевод в ЦЕРН: CERN/PS 93-03 (AR)).
4. Незлин М. В., Солнцев А. М.//Сов. ЖТФ. 1997. № 53. — 437 с.

*Данная работа поддержана грантами INTAS
№ 96-0966 и РФФИ № 99-02-17716.*

Space charge effects in the intense electron beams related to the electron cooling systems

*Yu. V. Korotaev, I. N. Meshkov, A. L. Petrov, A. O. Sidorin,
A. V. Smirnov, E. M. Syresin*
Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia

The review of researches performed by JINR-CERN-ITEP collaboration in 1994–1995 [1] and by JINR group in 1996–1988 years is presented. The research has the goal to study theoretically and experimentally a possibility of electron beam space charge neutralization and formation of a stable and intense neutralized electron beam related to the electron cooling systems.

The work is supported by INTAS, grant No. 96–0966, and RFBR, grant No. 99-02 17716.