

что приводит к дисперсионному уравнению

$$((\omega - kv)^2 - 2\omega_i \xi - \omega_{He}^2) \left( \omega^2 - \frac{\omega_i^2}{2} - \omega_{Hi}^2 \right) = \xi \omega_i^4.$$

Для того, чтобы это уравнение имело четыре действительных корня, достаточно, как и выше, выполнения условия  $\omega_{Hi}^2 \gg \omega_i^2 \xi$ . Это означает, что равновесие пучка с замагниченными ионами в сильном магнитном поле также будет устойчивым относительно аксиально-симметричных возмущений.

Проблема устойчивости электронно-ионного пучка относительно аксиально-симметричных возмущений исследовалась также в работах [6, 7]. Механизм «фокусировочной неустойчивости» [6] в целом соответствует рассмотренной нами неустойчивости пучка без магнитного поля, однако, в несколько других условиях (мы изучали пучок с ненулевым эмиттансом, который может быть, в общем случае, различным для электронной и ионной компонент).

Поступила 15 X 1979

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чириков Б. В. Устойчивость частичного компенсированного электронного пучка.— Атомная энергия, 1965, т. 19, с. 239.
2. Капчинский П. М. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. М., Атомиздат, 1966.
3. Ярковой О. И. Нестационарная самосогласованная модель азимутально-однородного кольца заряженных частиц во внешнем электромагнитном поле.— ЖТФ, 1966, т. 36, с. 988.
4. Lee E. P., Cooper R. K. General envelope equation for cylindrically symmetric charged-particle beams.— Particle Accelerators, 1976, vol. 7, p. 83.
5. Poukey J. W., Toepfer A. J. Theory of superpinched relativistic electron beams.— Phys. Fluids, 1974, vol. 17, p. 1582.
6. Ходатаев К. В., Цытович В. Н. О механизме ускорения ионов в мощных релятивистских электронных пучках.— Физика плазмы, 1976, т. 2, с. 301.
7. Ходатаев К. В., Цытович В. Н. Коллективное ускорение ионов в прямолинейном электронном потоке.— Физика плазмы, 1978, т. 4, с. 799.

УДК 539.124.17

#### РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ВОЗДУХЕ

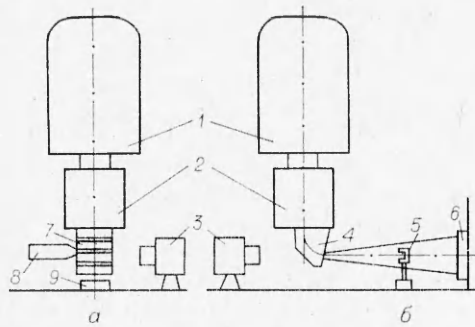
А. С. Артамонов, В. А. Горбунов, Н. К. Куксанов,  
Р. А. Салимов

(Новосибирск)

Исследования распространения электронных пучков в газе интересны как для развития физических представлений явления многократного рассеяния, так и для прикладных целей, например для электронно-лучевой технологии вне вакуума.

В данной работе приводятся результаты измерения плотности тока пучка электронов, распространяющегося в магнитном поле соленоида и в свободном от полей пространстве, приводятся данные измерения размеров пучка после поворота поперечным магнитным полем.

Основные элементы экспериментальной установки приведены на фиг. 1. Пучок электронов ускорителя 1, выведенный в атмосферу с помощью выпускного устройства 2, проходит через соленоид 7 (фиг. 1, а) и попадает на мишень 9. Дозиметрическое устройство 8 вводит под пучок



Ф и г. 1

графитового коллектора 5, передвигающегося по радиусу или вдоль оси пучка, измеряется радиальное распределение плотности тока.

Визуальное наблюдение пучка осуществлялось телевизионной установкой 3.

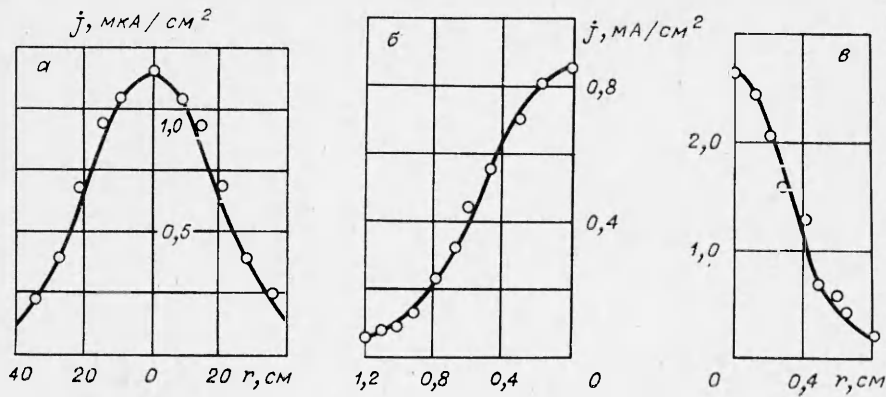
Ускоритель электронов прямого действия ЭЛВ-4 [1] дает непрерывный пучок с максимальной энергией  $1,5 \pm 3\%$  МэВ током до 30 мА. Выпускное устройство [2,3], работающее по принципу дифференциальной откачки канала ускоритель — атмосфера, формирует пучок так, что точка входа в атмосферу совпадает с его кроссовером. Радиус отверстия выходной диафрагмы равен 0,12 см. Эмиттанс пучка при энергии 1,4 МэВ составляет величину порядка  $3 \cdot 10^{-3}$  см·рад. Соленоид собран из шести катушек с внутренним диаметром 280 мм, высотой 55 мм, разделенных зазорами шириной 15 мм. Торцы соленоида закрыты железными наконечниками с отверстиями для входа и выхода пучка. Пульсации тока соленоида не превышают  $\pm 7\%$ . В зависимости от конфигурации наконечников получается однородное поле с индукцией  $B = 0,21$  Т на длине 40 см или линейно-парадающее поле от  $B = 0,1$  до  $B = 0,5$  Т на длине 24 см. Дозиметрическое устройство вставляется в зазор между катушками соленоида и экспонирует пучок движущейся щелью. В зависимости от радиуса и тока пучка ширина щели выбирается от 0,3 до 1,2 мм, а скорость от 0,35 до 200 см/с.

Поворотный магнит с полем 0,11 Т и секторным углом  $\pi/4$  применялся для измерения размеров пучка в поперечном поле. Для измерений на большом расстоянии от выпускного устройства секторный угол подбирался таким, чтобы пучок на выходе был осесимметричным.

Такие параметры пучка, как энергия  $E$  и ток  $I$ , контролируются измерительными приборами самого ускорителя. Радиальное распределение плотности тока пучка на входе в атмосферу находится по измеренной зависимости величины тока, прошедшего через отверстие в диафрагме, от меняющейся величины радиуса этого отверстия при фиксированном значении полного тока пучка, а эмиттанс оценивается по результатам измерения огибающей пучка внутри вакуумного канала выпускного устройства. В качестве материала, чувствительного к излучению, используется целлофан фирмы Du Pont типа MS-300 и астролон. Отпечатки на целлофане фотометрируются микроденситометром ДФЭ-10 с коллимирующей вставкой диаметром 1 мм, на астролоне — микрофотометром МФ-4. Пересчет коэффициента оптической плотности астролона в радиальное распределение плотности тока пучка  $j(r)$  проводится по [4], целлофана — по данным предварительной калибровки. При пересчете осциллограммы тока графитового коллектора в кривую  $j(r)$  учитывалось изменение эффективной площади коллектора из-за изменения угла падения электронов при больших  $r$ .

пленочный материал, чувствительный к излучению, и задает экспозицию облучения, необходимую для получения «отпечатка» пучка. Данные фотометрирования «отпечатка» пересчитываются в радиальное распределение плотности тока.

Для измерения на большом расстоянии (ввиду ограниченности пространства под выпускным устройством) пучок поворачивается магнитом 4 (фиг. 1, б) и принимается мишенью 6. С помощью

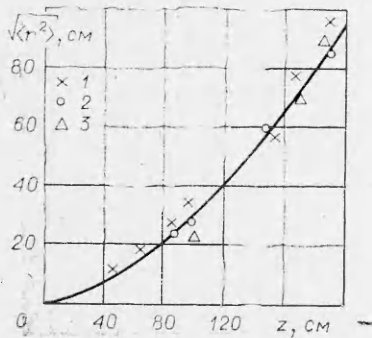


Ф и г. 2

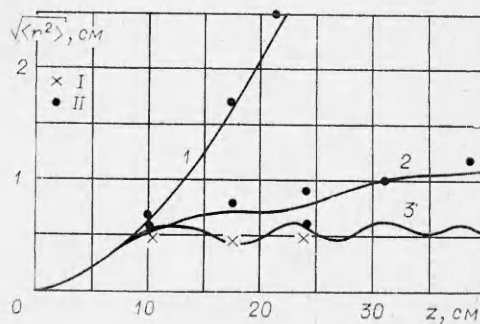
На фиг. 2 точками представлены измеренные значения радиального распределения плотности тока пучка типичных для экспериментов распределений  $j(r)$  (а — по графитовому коллектору, б — по астрологу, в — по целлофану), а сплошная линия — кривая Гаусса, соответствующая измеренному значению тока пучка. Для подавляющего большинства измерений отклонение экспериментальных точек от этой кривой не превышает  $+10\%$  при  $r \leq 1,5\sqrt{\langle r^2 \rangle}$ . На этом основании результаты всех экспериментов по измерению  $j(r)$  представлены в виде величины среднего радиуса  $r_0 = \sqrt{\langle r^2 \rangle}$  гауссова распределения в зависимости от  $z, I, V$ .

На фиг. 3 сплошная линия соответствует расчету для воздуха при нормальных условиях распределения плотности тока пучка с энергией  $E = 1,2$  МэВ по результатам работы [5], точки — измеренные значения (1 —  $I = 2,5$  мА, 2 — 10 мА, 3 — 20 мА). Оценки показывают малое влияние исходных параметров пучка на результаты этого эксперимента. Совпадение расчетных и измеренных значений  $j(r)$  говорит о слабом влиянии на характер распространения пучка в пространстве без полей с током до 20 мА таких эффектов, как разогрев воздуха и рассеяние на большие углы.

На фиг. 4 приведено распределение плотности тока пучка в поле соленоида при  $I = 1,5$  мА,  $E = 1,4$  МэВ (схема установки приведена на фиг. 1, а). Точки на фиг. 4 соответствуют результатам измерения величины среднеквадратичного радиуса пучка без магнитного поля (вдоль кривой 1), в однородном (вдоль кривой 2) и в линейно-нарастающем (вдоль кривой 3) поле соленоида. Линии 1 и 2 соответствуют расчету по [5], а 3 — численному счету для соответствующих магнитных полей ( $I$  — ре-



Ф и г. 3



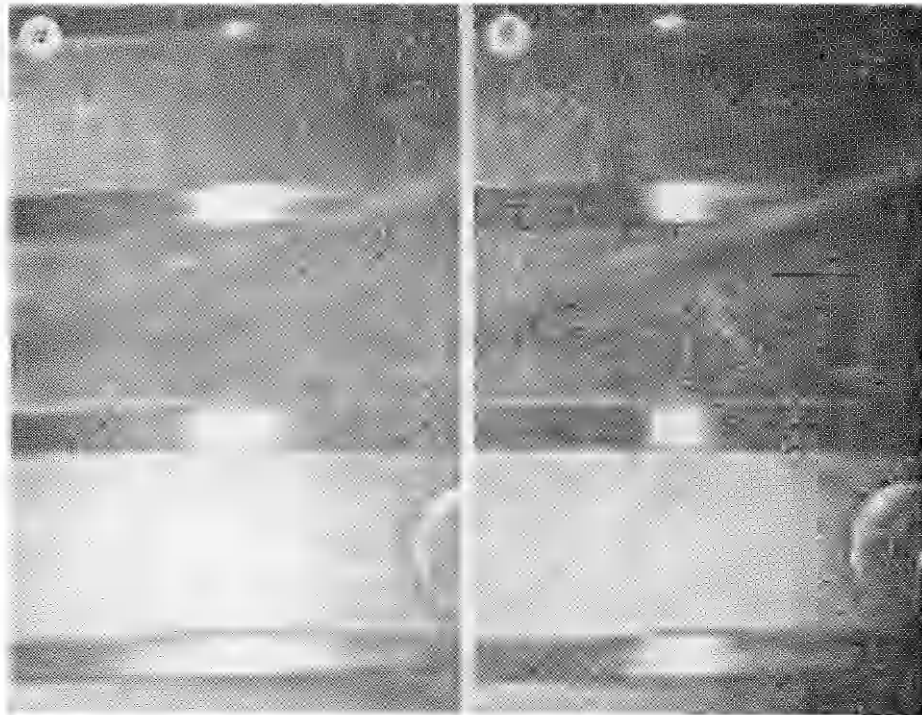
Ф и г. 4

$I$ , мА	$r_0$ , см
1,5	0,6
8	0,45
12	0,345
16	0,25
20	0,22

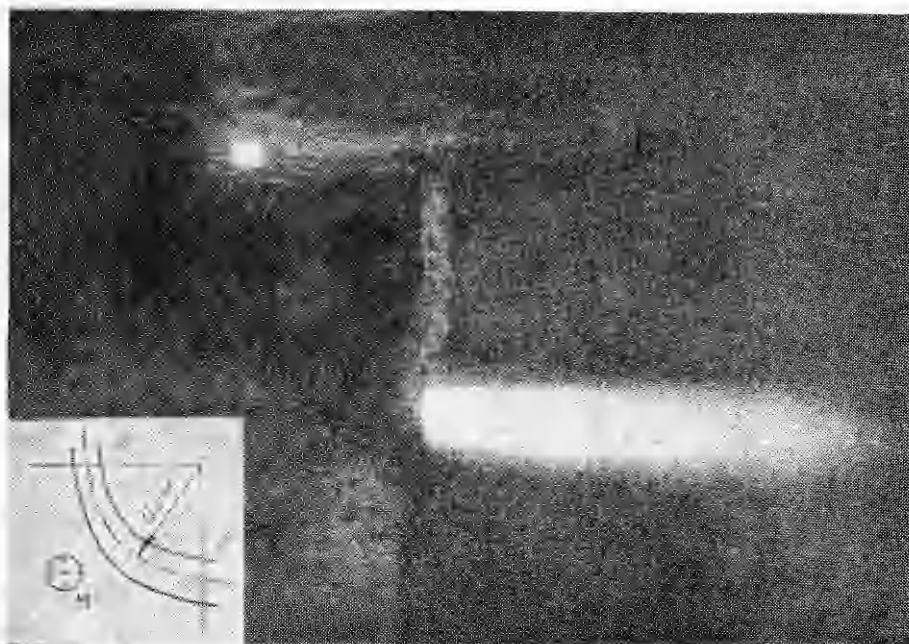
зультаты измерения целлофаном,  $II$  — астролоном). Вклад в величину  $r_0$  исходных параметров пучка по оценкам не превышает 3% при  $z = 10$  см и быстро падает с его ростом, т. е. измеренное  $j(r)$  определяется в основном процессом рассеяния. На фиг. 5 приведена фотография пучка внутри верхней части соленоида, сделанная с экрана телевизора ( $a$  — в отсутствие магнитного поля,  $b$  — в линейно-растущем поле).

В таблице приведены результаты измерения среднеквадратичного радиуса пучка в растущем поле соленоида при  $z = 24$  см,  $E = 1,4$  МэВ,  $I = 1,5; 8; 12; 16$  и  $20$  мА, из которых видно, что при увеличении тока пучка приблизительно в 13 раз (с 1,5 до 20 мА) средний радиус пучка уменьшается почти в 3 раза, при этом осевая плотность тока повышается в 100 раз (с 1,3 до 130 мА/см<sup>2</sup>). Этот эффект связан с уменьшением рассеяния электронов вследствие снижения плотности газа в зоне распространения из-за тепловыделения. По оценкам средняя температура воздуха в зоне распространения пучка с током 20 мА превышает 1000°C. Таким образом, при токе больше 5 мА в продольном магнитном поле характер распространения электронного пучка с  $r_0 = 0,5$  см заметно отличается от рассчитанного по теории многократного рассеяния без учета тепловыделения.

На фиг. 6 приведена фотография пучка ( $E = 1,4$  МэВ,  $I = 3$  мА, радиус разворота 6 см) на выходе и входе поворотного магнита, сделанная с экрана телевизора. В фольге из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм, размещенной на месте выхода пучка из магнита, проплавляется эллиптическое отверстие с размером вдоль поля 2,8 см, а поперек — 1,5 см.



Ф и г. 5



Ф и г. 6

Эксперименты иллюстрируют высокую эффективность применения магнитного поля для уменьшения расширения электронного пучка из-за рассеяния в воздухе, а поперечного — для его поворота и отклонения. Для токов в десятки миллиампер эффективность продольного магнитного поля увеличивается вследствие разогрева воздуха.

*Поступила 7 I 1980*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ауслендер В. Л., Салимов Р. А. Ускорители электронов Института ядерной физики СО АН СССР для народного хозяйства. — Атомная энергия, 1978, т. 44, вып. 5.
2. Будкер Г. И., Гончаров Н. Ф. и др. Устройство для выпуска концентрированного пучка электронов в воздух или газовую среду при атмосферном давлении. — В кн.: Материалы Всесоюзной конференции «Разработка и практическое применение электронных ускорителей». Томск, изд. Томск. ун-та, 1975.
3. Горбунов В. А., Куксанов И. К., Салимов Р. А., Черток И. Л. Выпуск в атмосферу концентрированного пучка электронов мощностью до 60 кВт ускорителя ЭлВ-4. — В кн.: Доклады III Всесоюзного совещания по применению заряженных частиц в народном хозяйстве. Л., 1979.
4. Санников Б. П. Использование тонких пластин полимеров для диагностики сильно-точных пучков электронов. Препринт ИЯФ СО АН СССР, № 74—47, 1974.
5. Farley F. J. M., Fiorentini G., Stocks D. C. Influence of an axial magnetic field on the multiple scattering of particle beams. — Nuclear Instruments and Methods, 1978, vol. 152, p. 353—356.