



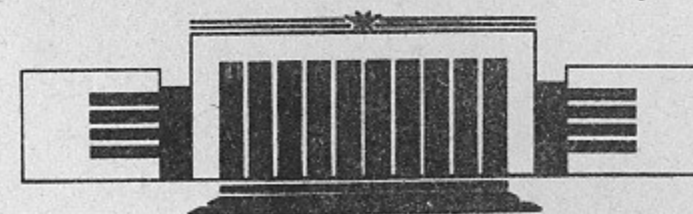
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

50

С.В. Мигинский, В.В. Перов

ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННОГО ЗАРЯДА
НА ГРУППИРОВКУ СГУСТКА

ИЯФ 93-92



НОВОСИБИРСК

ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННОГО ЗАРЯДА НА ГРУППИРОВКУ СГУСТКА

С.В. Мигинский, В.В. Перов
Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090 Новосибирск-90, Россия

А Н Н О Т А Ц И Я

Моделируется движение электронного сгустка в термоэмиссионном инжекторе микротрона-рекуператора лазера на свободных электронах. Показано, что собственный заряд существенно влияет на продольное и поперечное движения сгустка и обуславливает их взаимозависимость. Оценка показывает, что численное моделирование продольного и радиального движения методом разбиения сгустка на кольцевые макро-частицы с достаточной точностью требует $\sim 3 \cdot 10^{11}$ flops. Разумное использование приближений и допущений позволило сократить требуемые ресурсы на 4 порядка и сделать возможным моделирование процесса даже на стандартной IBM PC-AT за время ~ 30 мин.

Программа позволяет подобрать оптимальный режим группирователя (размещение и токи соленоидальных линз, амплитуды и фазы вч-колебаний в резонаторах), измерить чувствительность выходных параметров ко входным и сформировать способы согласованного изменения параметров инжектора, то есть "ручки", регулирующие выходные параметры независимо. Показано, что подходящим выбором режима можно минимизировать ухудшение эмиттанса в группирователе, обусловленное собственным зарядом и хроматизмом, до $\approx 5\pi$ мм·мрад при энергии 1.65 МэВ, что заметно меньше допустимого. Особо заслуживает внимания тот факт, что силы собственного заряда при некоторых условиях могут компенсировать продольные aberrации. Продольный фазовый объем удается уменьшить примерно на порядок (с 2 до 0.25 МэВ·пс) по сравнению с беззарядовым сгустком той же длины. Приведены результаты численного моделирования движения сгустка в различных режимах. Сделан вывод, что инжектор с термоэмиссионной пушкой может иметь параметры, сравнимые с фотоинжектором, работающем в непрерывном режиме.

В проекте лазера на свободных электронах [1] предусмотрен электронный инжектор, который должен обеспечивать следующие параметры сгустка:

| | |
|----------------------|---------------------------------|
| энергия инъекции | 1.65 МэВ ($\rho_s = 2.1$ МэВ); |
| заряд сгустка | > 2 нКл; |
| длительность сгустка | < 100 пс; |
| эмиттанс | $< 30\pi$ мм·мрад; |
| частота сгустков | 0...45.3 МГц; |
| частота вч-питания | 181.3 МГц. |

Упрощенная схема инъекции приведена на рис. 1. Особенности инжектора являются непрерывный режим работы и небольшая длительность сгустка на входе по сравнению с периодом частоты вч-питания ($\sim 65^\circ$).

Известно [2], что собственный заряд может значительно влиять на степень монохроматичности сгустка. Очевидно также и его влияние на поперечное движение. Оценим влияние собственного заряда на движение сгустка в группирователе.

Для поперечного движения. Линейная плотность заряда

$$\kappa = q / (\beta c t). \quad (1)$$

Поперечная сила

$$F = \frac{\kappa e}{2\pi \epsilon_0 \gamma^2}. \quad (2)$$

Расстояние, на котором радиус сгустка увеличивается вдвое под действием сил собственного заряда

$$Z_0 = \sqrt{\frac{4\pi r^2 c \beta \gamma t}{q e} \cdot m_e \epsilon_0}. \quad (3)$$

Подставляя $r = 5$ мм, $q = 2$ нКл, $t = 1$ нс, $\gamma \approx 1.6$, $\beta \approx 0.78$, получаем $Z_0 \approx 1$ м. Так как длина группировки составляет ~ 3 м, а плотность заряда в конце группировки возрастает на порядок,

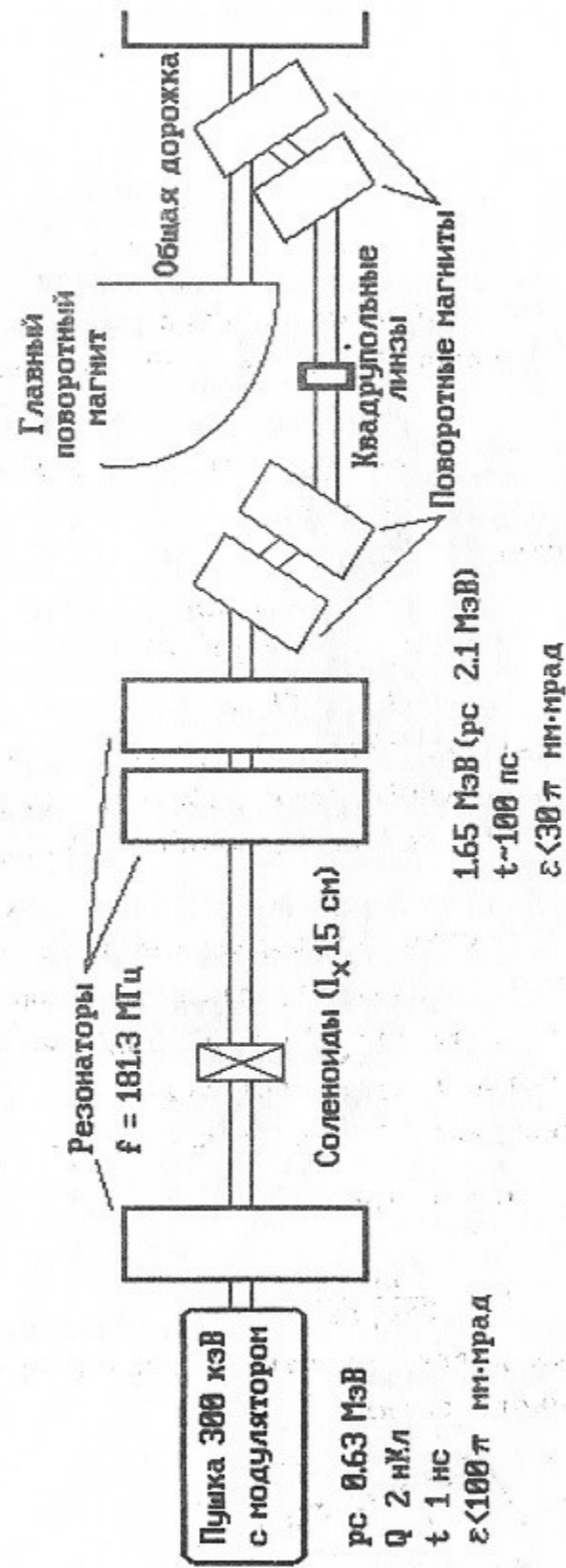


Рис. 1. Упрощенная схема инжекции микрофона-рекулатора ЛСЗ.

делаем вывод, что влияние собственного заряда на поперечное движение весьма существенно.

Для продольного движения. В системе центра масс сгустка

$$E \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{dz} \approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0 l^2}, \quad (4)$$

где l - длина сгустка: $l_0 \approx 30$ см в начале и $l_1 \approx 3$ см в конце группировки. Разность потенциалов начального и конечного состояний

$$|\Delta\phi| = \int_{l_1}^{l_0} Edl \approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_0} \right) \approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0 l_1} \approx 500 \text{ В}. \quad (5)$$

Таким образом, голова и хвост получают дополнительные продольные импульсы

$$|\Delta p_{\parallel}| = c\sqrt{m_e \cdot 2e|\Delta\phi|} \approx 20 \text{ кэВ}, \quad (6)$$

что сравнимо с набором импульса в группирующем резонаторе.

Кроме того, собственный заряд обуславливает взаимозависимость продольного и поперечного движения. В процессе группировки меняется линейная плотность заряда в сгустке k , а поперечная сила пропорциональна k . Обратное влияние менее очевидно. Дело в том, что продольное поле сгустка зависит от распределения зарядов не только по длине ($\frac{\partial k}{\partial z}$ в линейном приближении), но и по радиусу ($\frac{\partial r}{\partial z}$ в линейном приближении). Таким образом, продольное и поперечное движения сгустка в инжекторе должны моделироваться одновременно и взаимосвязанно с учетом собственного заряда.

Оценим необходимые для этого вычислительные ресурсы. Будем моделировать сгусток системой цилиндрических макрочастиц (при этом непонятно, как быть с азимутальным движением в соленоидальных линзах, но, положим, эта трудность преодолена). Длительность сгустка в системе центра масс ≈ 50 см, его радиус ≈ 5 мм. Продольное электрическое поле плоского блина спадает вдвое примерно на расстоянии его полурadiusа. Ясно, что эту зону существенного изменения поля следует разбить на несколько макрочастиц. Тогда получаем $N_z \geq 600$. Чтобы хоть как-то аппроксимировать поперечное движение, на фазовой плоскости $(r, \frac{dr}{dz})$ следует разместить хотя бы $N_r \geq 10$ макрочастиц (сгусток на входе обладает весьма существенными макроскопическими искажениями радиального фазового портрета, а его заряд неоднороден по сечению, так что приближение Капчинского-Владимирского [3] здесь

вряд ли допустимо). Положим на вычисление поля одной макро-частицы в одной точке 10 flops (явно заниженная оценка), 5 вычислений правой части в шаге Рунге-Кутты-Мерсона и 200 шагов на весь процесс. Перемножив все приведенные значения, получим $\sim 3 \cdot 10^{11}$ flops на процесс. Задача может быть легко решена при свободном доступе к суперкомпьютеру. Если же такового не имеется, можно попробовать воспользоваться каким-либо универсальным пакетом, в который, естественно, для экономии ресурсов введены какие-то допущения и предположения, вообще говоря, не согласованные с поставленной задачей. При этом результаты моделирования (эмиттанс) одного и того же инжектора различными универсальными пакетами [4, 5] могут отличаться более чем в три раза. Поэтому для моделирования процессов в описанном инжекторе создана специальная программа, согласованная с поставленной задачей.

Программа устроена следующим образом. По длине сгусток разделен на несколько (стандартно 15) объектов, несущих фиксированный заряд и совершающих только продольные движения. Линейная плотность заряда сгустка k аппроксимируется квадратичным сплайном (условие на краях $k = 0$). В некоторый момент, когда сгусток становится достаточно коротким и неоднородным, фиксируются вчетверо больше плоских "блинов" (коллокаций), заряды и начальные импульсы которых вычисляются сплайн-интерполяцией, и в дальнейшем рассматривается продольное движение таких "блинов". Такое разделение наилучшим образом отражает реальность при ограниченности ресурсов.

Поперечное движение считается в пяти сечениях сгустка: 1 и 5 - по одному беззарядовому объекту, 2 - 4 сечения разбиты на кольцевые объекты, несущие заряд и совершающие только радиальные движения. Функция распределения заряда по радиусу объекта представляет собой равнобедренный треугольник. Между сечениями радиус сгустка интерполируется сплайном. Чтобы корректно учесть движение в соленоидальных линзах, каждая из них представлена тремя тонкими линзами, причем их расположение и распределение оптической силы подбирались по максимальному соответствию исходной линзе (при этом, разумеется, моделировалось и азимутальное движение).

Продольное собственное поле интегрируется по формуле Гаусса, пока существует сплайн k . При этом в ближайших к точке наблюдения интервалах интегрирования вместо формулы Гаусса

используется аналитическое разложение интеграла, учитывающее $\frac{\partial k}{\partial z}$ и $\frac{\partial r}{\partial z}$. После перехода к коллокациям суммируется поле "блинов" каждый раз в двух точках с усреднением (для повышения порядка аппроксимации). Распределение заряда по радиусу для всех блинов полагается подобным $(\sqrt{r_0^2 - r^2})$, их поле в этом случае выражается простой формулой. Выбор модели распределения заряда по радиусу весьма мало влияет на результат счета.

При вычислении радиального собственного поля полагается, что на рассматриваемый объект воздействуют только те объекты того же сечения, которые частично или полностью попадают внутрь него. Линейная плотность заряда k , необходимая для расчета радиальной силы, вычисляется упомянутой сплайн-аппроксимацией с поправкой на конечную длину сгустка. После перехода на коллокации "эффективная" k вычисляется как интегральное поперечное поле всех продольных объектов в двух соседних точках с усреднением.

Учитывается $s < \infty$ всюду.

Учитывается поле зарядов отражения в вакуумной камере.

Учитываются фокусирующие и дефокусирующие поля резонаторов.

Достоверность и точность программы контролировались: двукратным разнесенным во времени написанием отдельных фрагментов со сверкой; преемственностью версий (7 основных и много под-версий); соответствием полей аналитическим оценкам в модельных случаях; соответствием полей, вычисленных двумя способами (сплайн - коллокации); двукратным прогоном одних и тех же объектов с "обращением времени"; счетом с увеличенной размерностью. Три последних способа позволяют прогнозировать ошибки моделирования, обусловленные как неточностью численной аппроксимации модели, так и неточностью самой модели. Показано, что эти ошибки (по эмиттансу и энергетическому разбросу) по крайней мере пятикратно меньше получаемых значений.

Рис. 2 иллюстрирует влияние собственного заряда на продольное движение сгустка в группирователе. Это результаты счета ("твердая копия" экрана) одной из первых версий программы, так что поперечное движение пока заморожено, $r = 5$ мм. Присутствует только группирующий резонатор, сгусток движется слева направо. Пять продольных фазовых портретов соответствуют координатам центра сгустка (отсчитанным от центра группирующего резонатора) в правом верхнем углу. Видно, что в некоторый

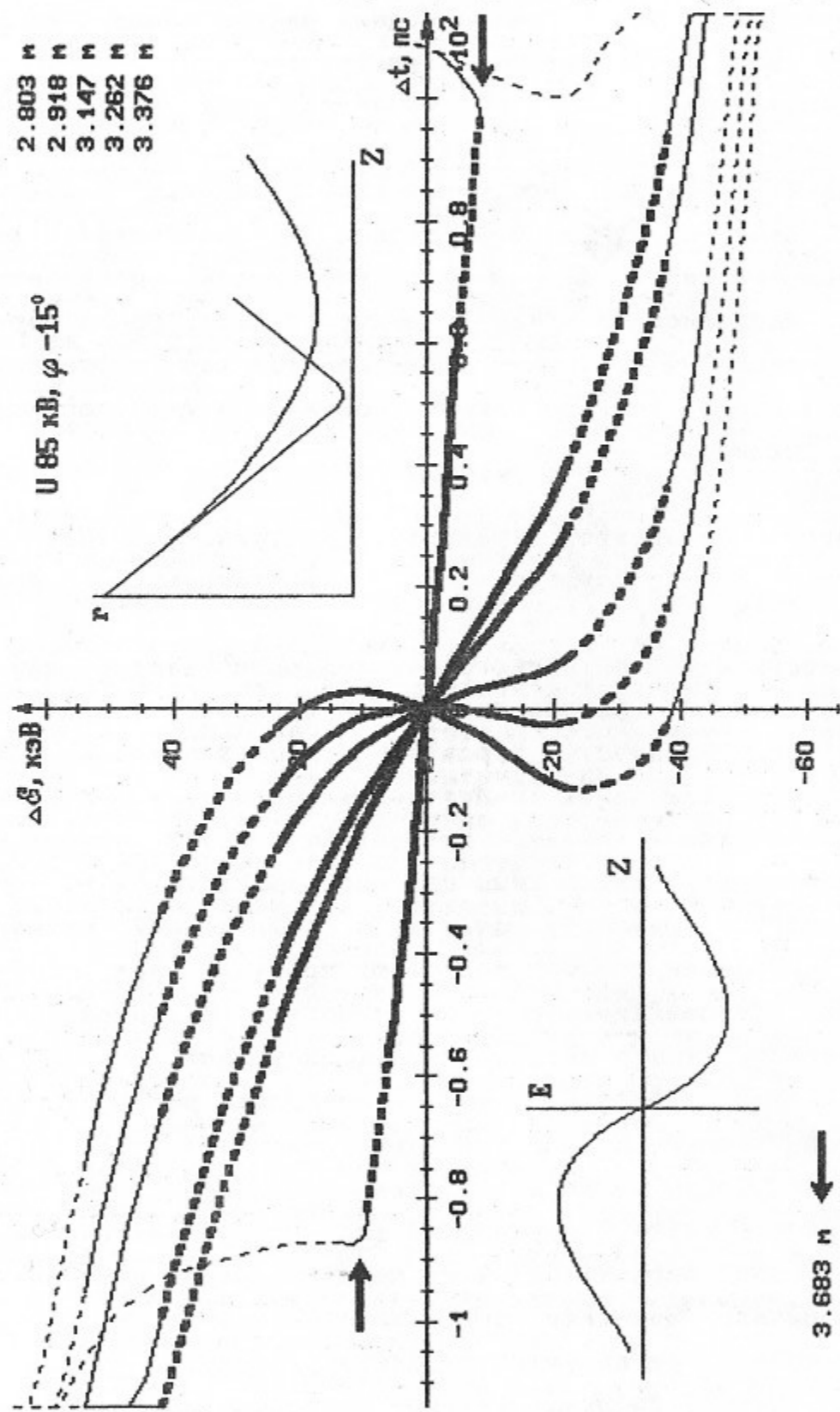


Рис. 2. Группировка сгустка без заряда (5 фазовых портретов) и с зарядом 2 нКл (фазовый портрет помечен стрелками). На врезках: слева внизу — продольное поле заряда сгустка, справа вверху — зависимость длины сгустка от пройденного расстояния.

момент между 3 и 4 положением возникает идеальная группировка (особенность $k(z)$) центральной части, затем особенность раздваивается и расходится к голове и хвосту сгустка — возникает перегруппировка. Имеется значительная кубическая продольная aberrация, обусловленная нелинейностью закона дисперсии $v_z(y)$ и набора энергии в резонаторе $\Delta U(t)$ (напомним, что протяженность сгустка на входе инжектора составляет $\approx 65^0$ на частоте вч-питания). Квадратичная aberrация устранена подходящим выбором фазы вч-колебаний. Для сравнения здесь же помещен фазовый портрет сгустка с зарядом 2 нКл при тех же параметрах вч-питания в момент наилучшей группировки (отмечен стрелками, координата — слева внизу). Видно, что такой сгусток не удается сделать короче 170 пс, что группируется он позже и что его продольные aberrации во много раз меньше. Особенности k возникают не в центре, а на краях, где плотность заряда мала. Собственное поле гауссова сгустка выглядит, как на врезке слева внизу. Такое поле может скомпенсировать кубическую продольную aberrацию при некоторых оптимальных условиях. Если изобразить зависимость длины сгустка от координаты его центра (врезка справа вверху) то кривая 1 соответствует беззарядовому сгустку, а кривая 2 — сгустку с существенным зарядом. Видно, что область хорошей группировки существенно расширилась и, следовательно, уменьшилась чувствительность инжектора к амплитуде и фазе группирующего поля.

На рис. 3, 4 приведены результаты счета последней версии программы. Режим работы инжектора каждый раз оптимизирован для соответствующей длины группировки. При этом пришлось обратить особое внимание на порчу эмиттанса в группирователе, причины которой в порядке убывания значимости следующие. (а) Вариации линейной плотности заряда вдоль сгустка и, следовательно, поперечных сил, обусловленных этим зарядом. Если вначале поперечные фазовые портреты (ПФП) всех сечений сгустка представляли отрезки прямой и совпадали, их дальнейшие движения будут различны и ПФП развернется в "бабочку" (рис. 5а). (б) Хроматизм линз приводит к тому же явлению, так как на этапе группировки сгусток существенно немонохроматичен. (с) Высшие моды колебаний в поперечной фазовой плоскости: так как функция распределения электронов в сгустке, вообще говоря, не является согласованной, каждое сечение осуществляет довольно сложные движения в поперечной фазовой плоскости, что приводит к искри-

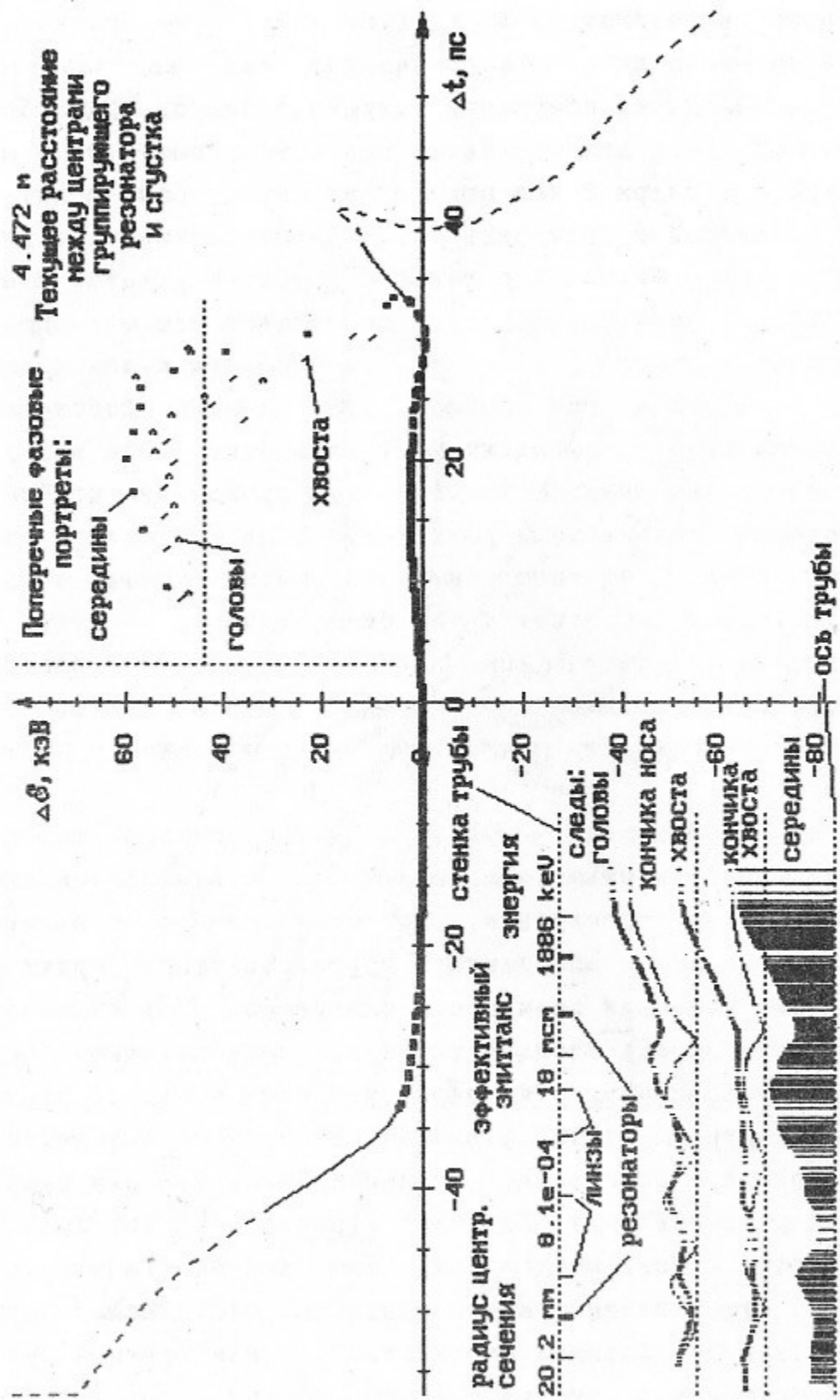


Рис. 3. Сгусток с зарядом 2 нКл, сгруппированный и доускоренный в оптимальном режиме на длине группировки 3 м.

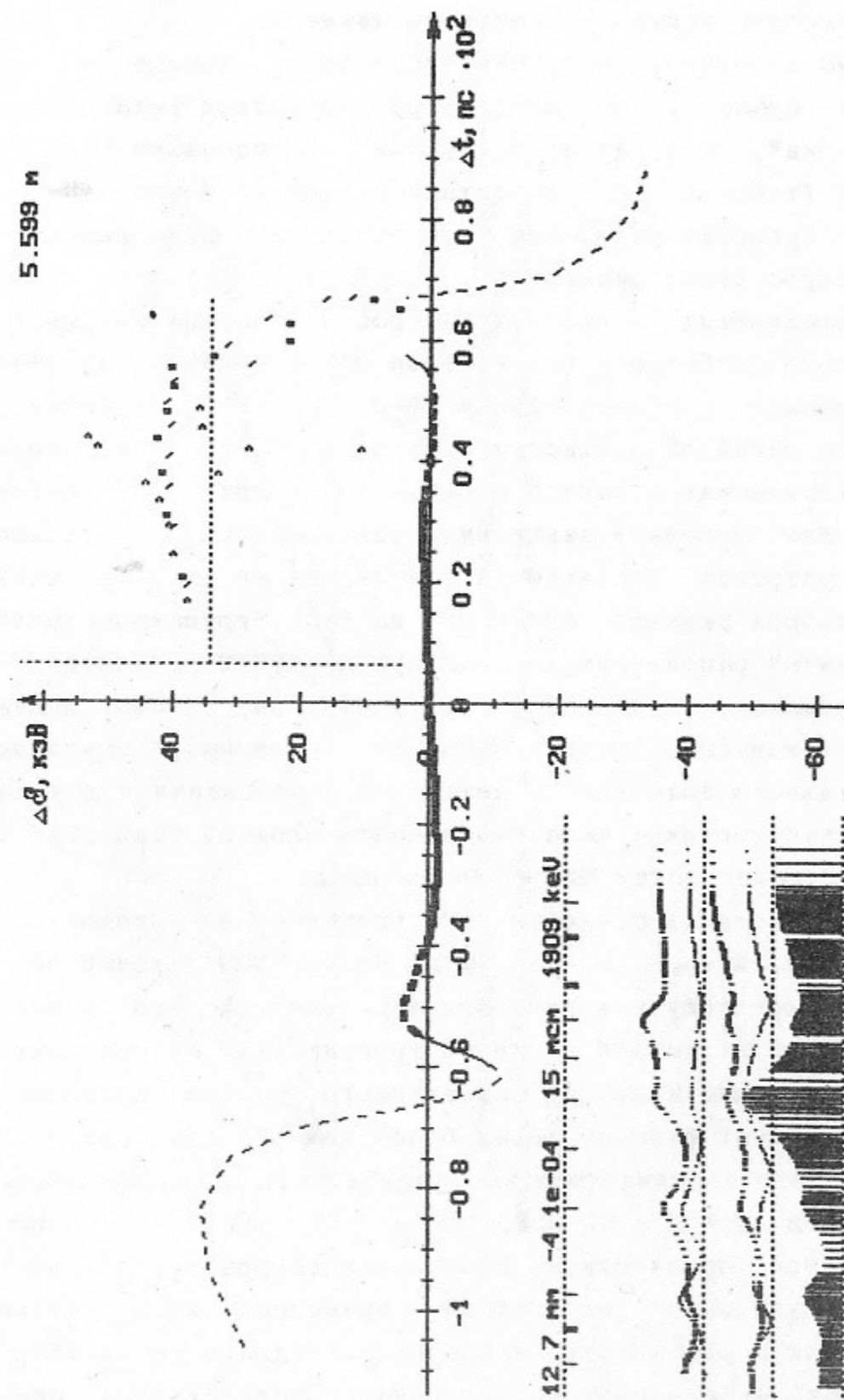


Рис. 4. То же на длине 4 м.

влениям ПФП. Наиболее существенна вторая мода (рис. 5б). И, наконец, (д) имеется фазовая зависимость радиальных сил в резонаторах, но они достаточно малы и тем более малы их различия. Видно, что оптимизацией режима удалось достичь совмещения ПФП трех сечений сгустка и приведенное значение эмиттанса обусловлено высшими модами радиального движения.

Необходимо отметить, что пока отсутствуют точные данные моделирования пушки и на входе группирователя установлена "идеальная пушка", которая дает сгусток с одинаковыми ПФП во всех сечениях (т.е. $\epsilon = 0$). Естественно, конечный эмиттанс на выходе пушки обусловит ухудшение такового и на выходе инжектора. Этот вопрос стоит рассмотреть подробнее. Эмиттанс пушки имеет три составляющих: тепловой разброс поперечных импульсов вкупе с сеточным разбросом, искривление ПФП сечений из-за сферической аберрации и несовпадение ПФП сечений ("бабочка") из-за разности линейной плотности зарядов. Первая составляющая носит микроскопический характер и никак не может быть скомпенсирована. Две последние аналогичны таковым в группирователе и могут быть устранены (разумеется, если они не очень велики) подходящим выбором режима. Для этого на вход "группирователя" нужно "поставить" рассчитанную "реальную пушку" и провести оптимизацию режима. Таким образом, требуется, чтобы пушка обеспечила минимальный микроскопический (истинный) эмиттанс (оценка достижимого значения 3π мм·мрад). Требования к другим параметрам менее жесткие: желательно иметь площадь "бабочки" $\leq 100\pi$ мм·мрад и искривления ПФП $\leq 30\pi$ мм·мрад.

Разумеется, оптимизировалось одновременно и продольное движение сгустка. Интересно, что малый продольный фазовый объем сгустка удастся получить лишь при определенной его длине, достаточно жестко связанной с длиной группировки. Из сравнения с рис. 6 видно, что наличие собственного заряда позволяет уменьшить продольный фазовый объем более чем в восемь раз - до $\approx 75\pi$ кэВ·пс, что в принципе дает возможность сгруппировать его в дальнейшем (при $W \approx 60$ МэВ, $\Delta W \approx \pm 250$ кэВ) до 0.7 пс! Этому, разумеется, препятствует продольная аберрация, обусловленная косинусоидальной (нелинейной) временной зависимостью ускоряющего поля в резонаторах микротрона. Однако такая аберрация может быть компенсирована введением соответствующих предискажений в продольный фазовый портрет сгустка в группирователе, что сводится к изменению его режима.

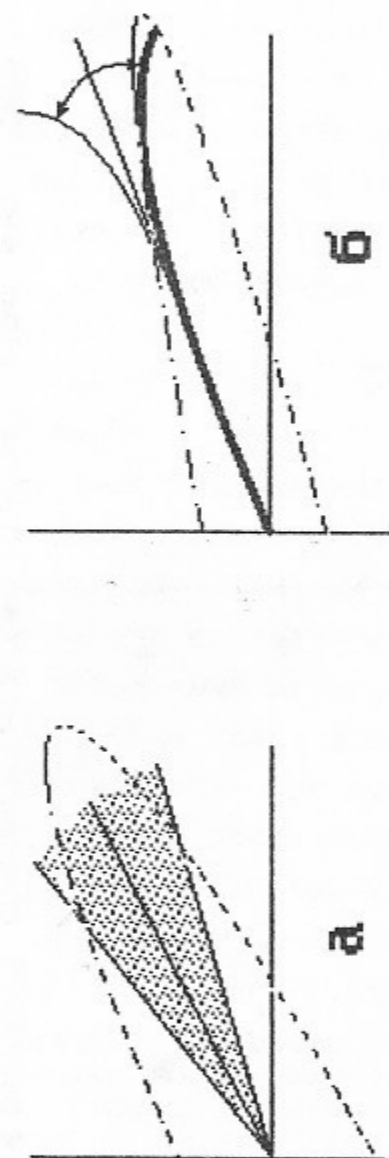


Рис. 5. Увеличение эффективного эмиттанса из-за несовпадения поперечных фазовых портретов сечений (а) и сферической аберрации сил собственного заряда (б).

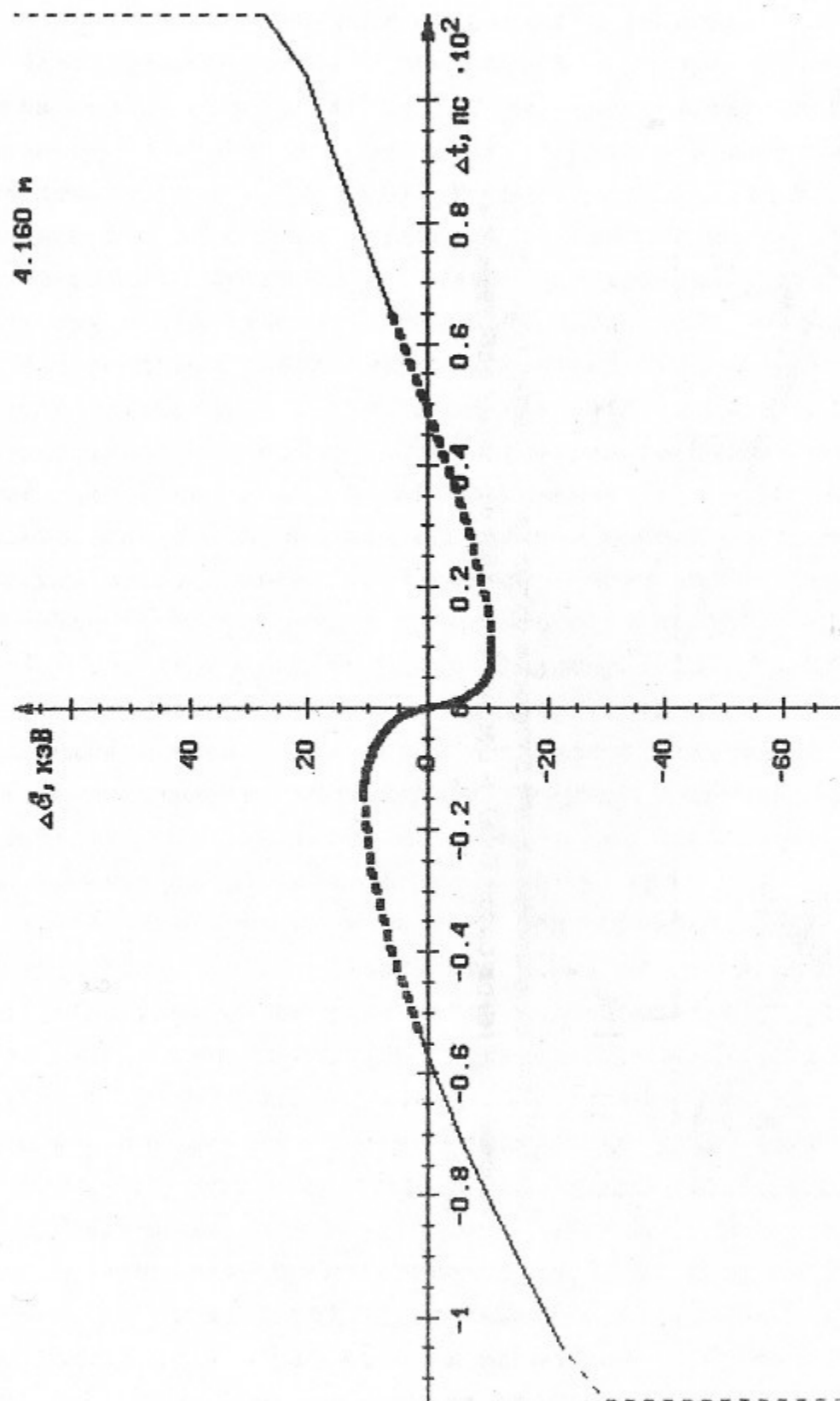


Рис. 6. Сгусток с зарядом ΔQ , сгруппированный и доускоренный в оптимальном режиме на длине группы — ровки 3 м.

Программа имеет еще два полезных применения. Изменяя параметры и начальные условия, можно измерить чувствительность системы к таким изменениям, то есть определить ее техническую реализуемость. В исследованных режимах допустимые отклонения токов соленоидов составляют не менее 2%, фаз вч-питания — 1° , амплитуд поля в резонаторах — 1%, заряда сгустка — 10%. Можно также сформировать такие согласованные изменения параметров ("ручки"), которые приводят к изменению лишь одного выходного параметра. Даже если счет оказался не совсем точным, такими "ручками" можно настроить реальную машину, имея минимум диагностики. Например, в одном из режимов оказалось, что один из соленоидов перемещает ПФП центрального сечения относительно двух других ПФП, практически не влияя на продольное движение. Другой соленоид аналогичным образом перемещает ПФП хвостового сечения. А еще два соленоида практически не влияют на ПФП, изменяя при этом продольный фазовый портрет определенным образом.

В заключение сравним описанный инжектор с уже известными. На рис. 7 видно, что он попадает в область типичных значений параметров. Необходимо отметить, что большинство обозначенных на рисунке составляют фотоинжекторы, работающие в импульсном режиме. Рекордные значения достигнуты на инжекторах типа BNL [6]. Инжектор BNL представляет собой низкоэффективный ($\sim 10^{-4}$) фотокатод, освещаемый лазером ($\lambda = 266$ нм, 170 мДж), эмиттирующий импульсы тока 130 А длительностью 5 пс и помещенный в резонатор на 2.856 ГГц с напряженностью поля 100 МВ/м. Такие параметры могут быть достигнуты лишь в импульсном режиме с невысокой частотой повторения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вещеревич В.Г., Винокуров Н.А., Воблый П.Д. и др. Проект разрезного микротрона-рекуператора для лазера на свободных электронах. Препринт ИЯФ 90-82. Новосибирск, 1990.
2. Travier C., Gao J. LAL (ORSAY) RF gun project. EPAC-90, 706-708
3. Капчинский И.М. Теория линейных резонансных ускорителей: Динамика частиц. М., 1982.
4. Frehault J., Cocu F., Dei-Gas R., et al. Beam dynamics studies in a low-frequency high-peak power laser-driven RF-gun. EPAC-90, 691-693.
5. Kugler H., Pisent A., Riche A.J., Strode J. Beam dynamics simulations of the RF-gun, particle source of the CLIC test facility. EPAC-90, 709-711.
6. Dei-Gas R. Review of high-brightness electron guns. EPAC-92, 109-113.

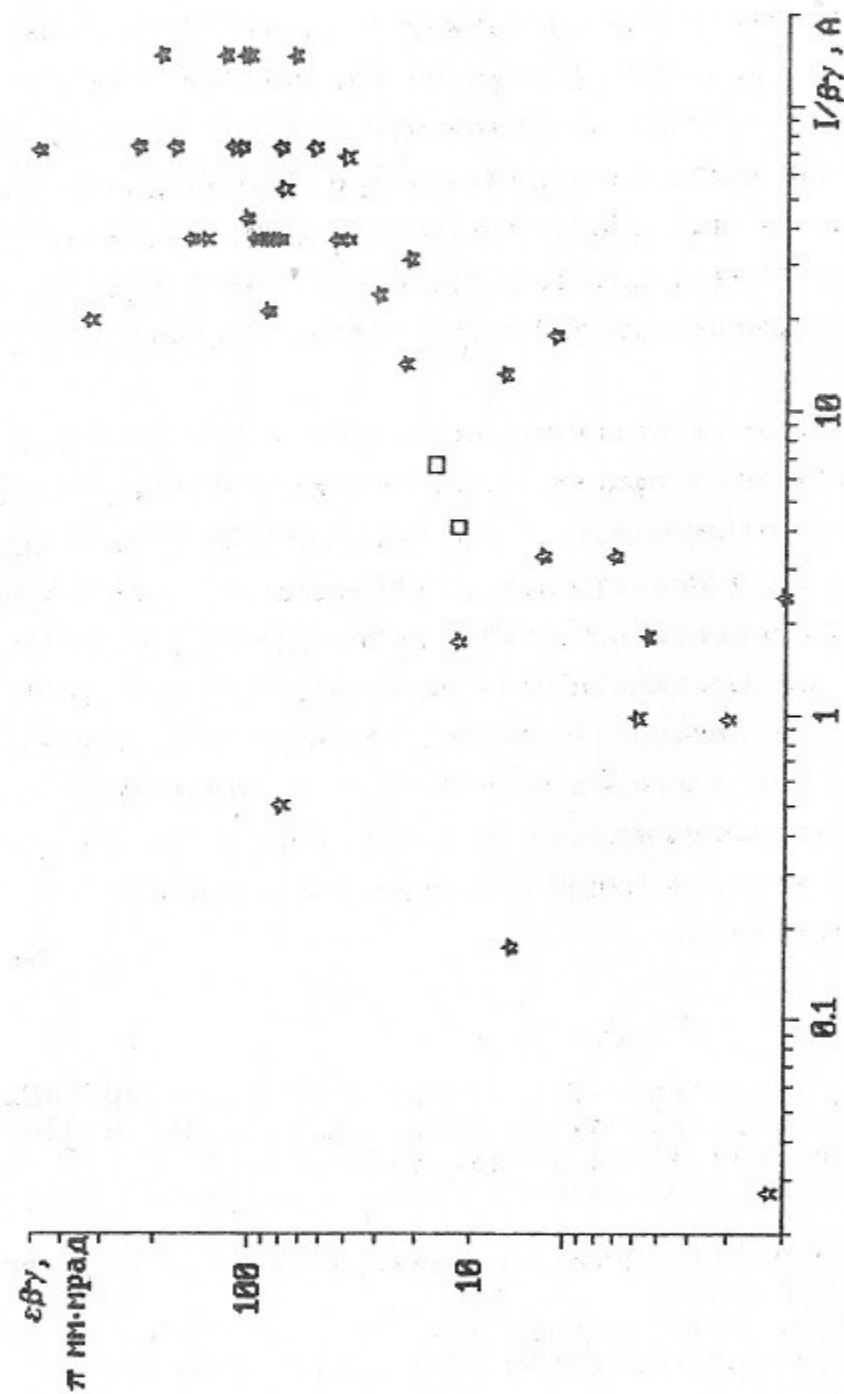


Рис. 7. Параметры инжекторов (как расчетные, так и измеренные) в координатах нормализованный ток — нормализованный эмиттанс по данным конференции ЕРАС-98 и ЕРАС-92 (☆) и по данным, приведенным в настоящей работе (□).

С.В. Мигинский, В.В. Перов

Влияние собственного заряда
на группировку сгустка

ИЯФ 93-92

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 1 ноября 1993 г.

Подписано в печать 2.11. 1993 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,3 печ.л., 1,0 уч.-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ N 92

Обработано на IBM PC и отпечатано

на ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.