

# Оптимизация параметров электронного пучка в ускорителе ЛИУ-10М

**В. С. Гордеев, И. В. Викторов,  
Е. С. Михайлов, Г. А. Мысков,  
И. В. Паршина**

*Проведены численные расчеты ускорителя ЛИУ-10М. Показано, что при существующей конфигурации диодного узла и максимальных для ЛИУ-10М параметрах инжекции (3 МэВ, 50 кА) возможны значительные (до 40 %) потери пучка в ускорительном тракте. В результате расчетов оптимизирована геометрия катода инжектора, что позволило избежать утечки электронов пучка на стенки ускорительного тракта и существенно улучшить выходные параметры ускорителя.*

## *Введение*

С момента ввода в эксплуатацию и по настоящее время на линейном индукционном ускорителе ЛИУ-10М [1, 2] произведено более 3000 рабочих импульсов. В процессе экспериментальной отработки ускорителя обнаружилось, что инжектируемый пучок окружен "ореолом" из электронов, эмитируемых с конической части катода. Его диаметр достаточно велик, примерно 160 мм, что сравнимо с апертурой ускоряющего тракта ( $\varnothing$  200 мм). В процессе ускорения наблюдалось увеличение поперечных размеров пучка и сопровождающего ореола. Это приводило к попаданию электронов на ускорительные трубки нескольких последних индукторов, что инициировало электрические пробой по поверхности их изоляторов.

Для подавления паразитной эмиссии необходимо оптимизировать распределение магнитного поля в инжекторе и геометрию катода. При оптимизации, наряду с исследованием динамики пучка электронов в инжекторе, необходимо исследовать процессы его ускорения и транспортировки в ускорителе из-за возможных потерь заряда пучка на стенках вакуумного тракта.

В данной работе представлены результаты оптимизации катода инжектора с учетом динамики пучка в ускорительном тракте. Расчеты проведены на полномасштабной модели ускорителя с использованием электромагнитного кода BEAM25, разработанного во ВНИИЭФ [3].

## *Расчетная модель*

Ускоритель ЛИУ-10М состоит из инжектора, 16 однотипных индукторов, тракта транспортировки (ТТ), состоящего из трех секций длиной 1 м и выводного устройства (ВУ) (рис. 1). При построении расчетной модели учитываются не только область формирования и ускорения пучка,

но и системы формирования высоковольтных импульсов инжекторов и индукторов. Расчеты проводятся на прямоугольной неравномерной сетке, размеры которой по оси  $z - kz = 1250$ , по оси  $r - kr = 100$ . Средний шаг сетки по оси  $z - hz \approx 12$  мм, по оси  $r - hr \approx 6$  мм.

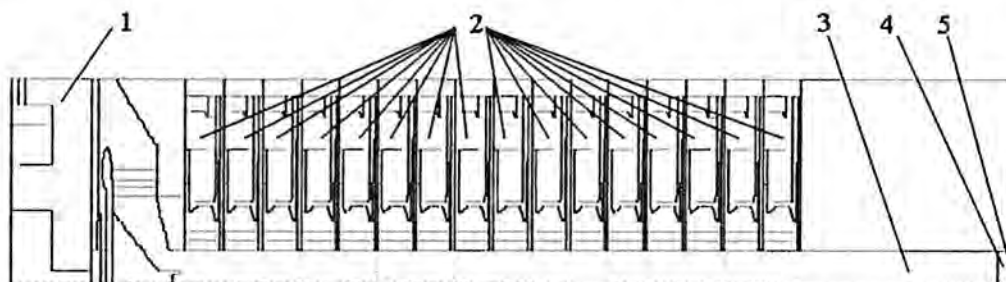


Рис. 1. Расчетная схема ускорителя ЛИУ-10М

Сильноточный пучок электронов, сформированный в инжекторе 1, ускоряется в ускорительном тракте из 16 индукторов 2. После ускорения пучок заряженных частиц попадает в ТТ 3 и далее в ВУ 4, где он сжимается в радиальном направлении в нарастающем магнитном поле, после чего попадает на мишень 5.

Исследования процессов ускорения и транспортировки проводились при длительности импульса тока пучка на полувысоте ( $\sim 20$  нс), меньшей, чем длительность импульса ускоряющего напряжения ( $\sim 22$  нс) в индукторах. В этом случае, при удачном подборе временной программы включения индукторов, удастся избежать потерь заряда пучка на отрицательной (тормозящей) полярности ускоряющего напряжения и возможно ускорение без изменения формы импульса тока пучка. Поэтому облегчается учет частиц, теряемых на стенках вакуумного тракта ускорителя.

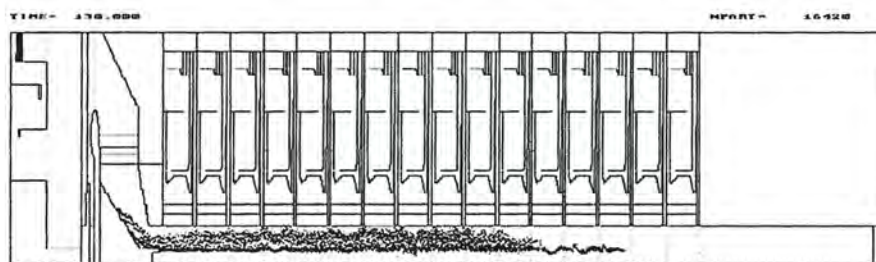
Сильноточный пучок релятивистских электронов в ускорителе ЛИУ-10М ускоряется в импульсном ведущем магнитном поле. Распределение магнитного поля вдоль оси неоднородно, средняя величина магнитного поля в ускорительном тракте и ТТ  $\sim 0,5$  Тл. В ВУ поле нарастает до  $\sim 1$  Тл. В расчетной схеме ускорителя распределение магнитного поля задается на оси установки. В точках вне оси магнитное поле вычисляется по формулам параксиального разложения с точностью  $O(r^4)$  [4].

### Расчеты ЛИУ-10М с неоптимизированным катодом

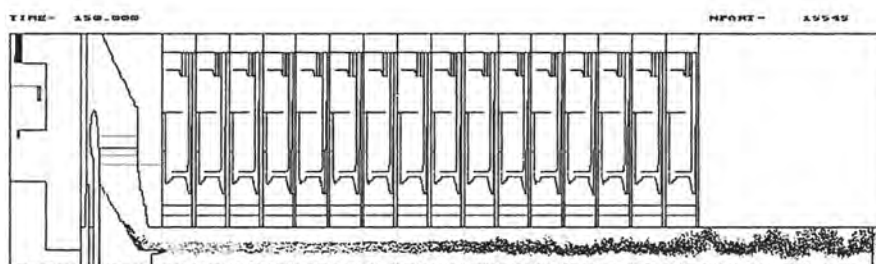
Расчеты с неоптимизированным катодом проводились для диаметра его цилиндрической части  $d_c = 80$  мм. Для амплитуды ускоряющего напряжения  $U_D \approx 3$  МВ (расчет 1) в инжекторе формируется пучок диаметром 170 мм, который в процессе ускорения увеличивается до 200 мм (рис. 2).

По мере продвижения вдоль ускорителя пучок теряет часть своего заряда. Амплитуда тока в сечении инжекции ( $z = 2,63$  м) равна 51 кА, в сечении стыка 16-го индуктора с ТТ ( $z = 11,83$  м) – 41 кА и на мишени ( $z = 15,11$  м) – 35 кА (рис. 3). Длительности импульсов тока во всех сечениях остаются практически неизменными: длительность импульса тока в сечении инжекции равна 20 нс, на мишени – 19 нс.

С целью уменьшения потерь заряда в ускорительном тракте инжектор работает с пониженным ускоряющим напряжением в диоде ( $U_D \approx 2$  МВ). В этом случае в инжекторе формируется пучок диаметром 120 мм (расчет 2), который в процессе ускорения увеличивается до 200 мм в тракте транспортировки (рис. 4).



а



б

Рис. 2. Распределение частиц в плоскости  $r$ - $z$  (расчет 1): а -  $t = 130$  нс; б -  $t = 150$  нс

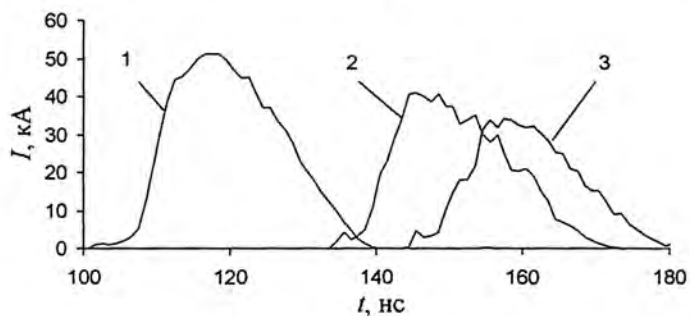


Рис. 3. Импульсы тока пучка в разных сечениях (расчет 1):  
1 -  $z = 2,63$  м; 2 -  $z = 11,89$  м; 3 -  $z = 15,11$  м

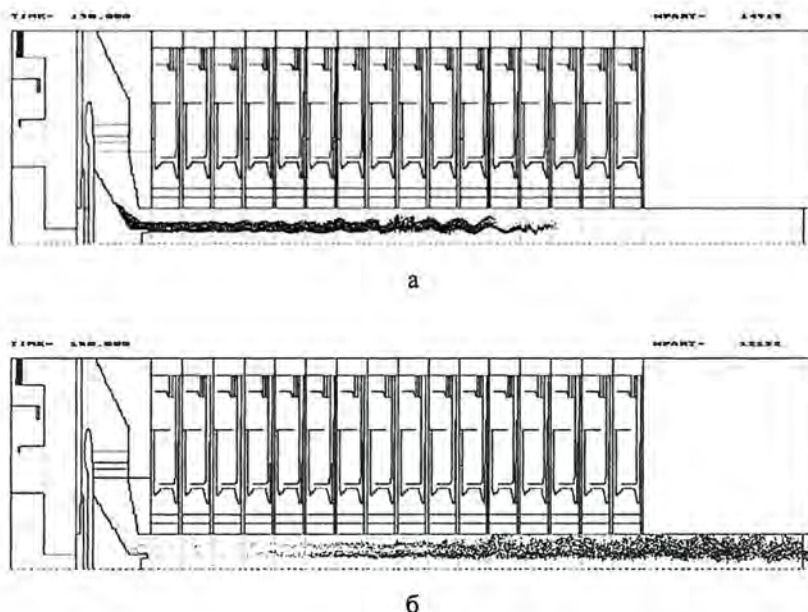


Рис. 4. Распределение частиц в плоскости  $r$ - $z$  (расчет 2): а –  $t = 130$  нс; б –  $t = 150$  нс

По мере продвижения вдоль ускорителя амплитуда и длительность импульса тока снижаются незначительно: с 20 до 19 кА и с 20 до 17 нс соответственно (рис. 5).

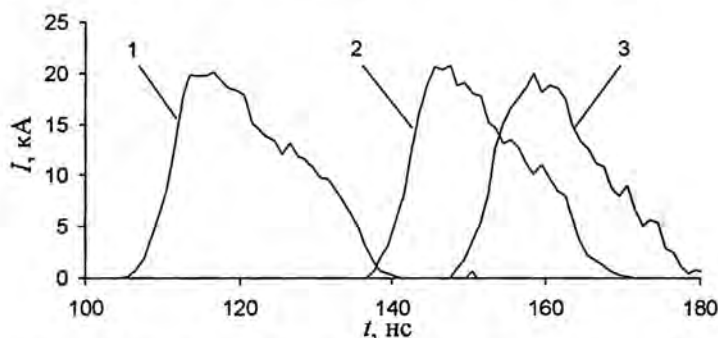


Рис. 5. Импульсы тока пучка в разных сечениях (расчет 2):  
1 –  $z = 2,63$  м; 2 –  $z = 11,89$  м; 3 –  $z = 15,11$  м

Работа с пониженным напряжением в инжекторе приводит к значительному, почти в 2 раза, уменьшению выходных параметров ускорителя: полный заряд на мишени уменьшается с  $6 \cdot 10^{-4}$  Кл для режима  $U_D \approx 3$  МВ до  $3,1 \cdot 10^{-4}$  Кл для  $U_D \approx 2$  МВ, а полная энергия на мишени с 12,3 до 6,3 кДж соответственно.

С целью устранения паразитной эмиссии и повышения выходных параметров ускорителя необходимо оптимизировать геометрию катода инжектора и распределение магнитного поля в нем. Изменение распределения магнитного поля в инжекторе требует переделки его соленоидов, что приводит к значительным материальным расходам и затратам по проведению расчетных и конструкторских работ. Наиболее простым решением является оптимизация геометрии катода при заданном распределении магнитного поля в инжекторе.

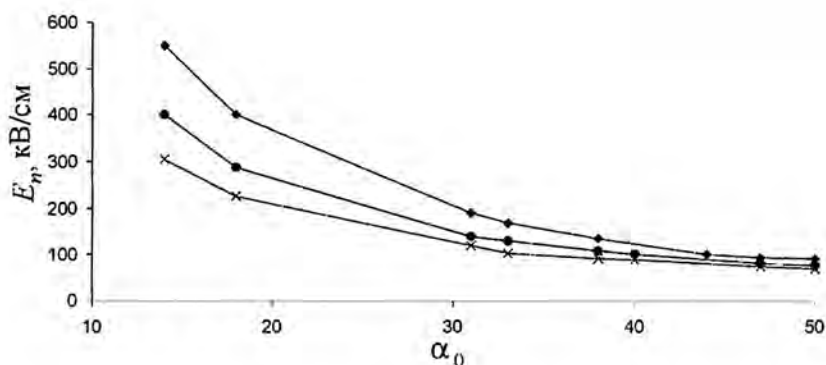


Рис. 6. Зависимость максимальной напряженности поля на конической поверхности катода от  $\alpha_0$  при различных  $d_c$ :  $\blacklozenge$  – 40 мм;  $\bullet$  – 80 мм;  $\times$  – 120 мм

Для подавления паразитной эмиссии необходимо изменить геометрию катода таким образом, чтобы напряженность электрического поля на ее конической поверхности не превышала некоторого порогового значения  $E_n = 100$  кВ/см. При оптимизации геометрии катода увеличивали угол между образующей его конической части и осью симметрии –  $\alpha_0$ . С увеличением  $\alpha_0$  максимальная напряженность уменьшается и для некоторого значения  $\alpha_{0\text{опт}}$  становится меньше  $E_n$  для всех диаметров  $d_c$  (рис. 6).

### Расчеты ЛИУ-10М с оптимизированным катодом

Для случая  $d_c = 80$  мм,  $U_D \approx 3$  МВ (расчет 3) в инжекторе формируется пучок диаметром ~80 мм, который в процессе ускорения увеличивается до 140 мм в ТТ (рис. 7).

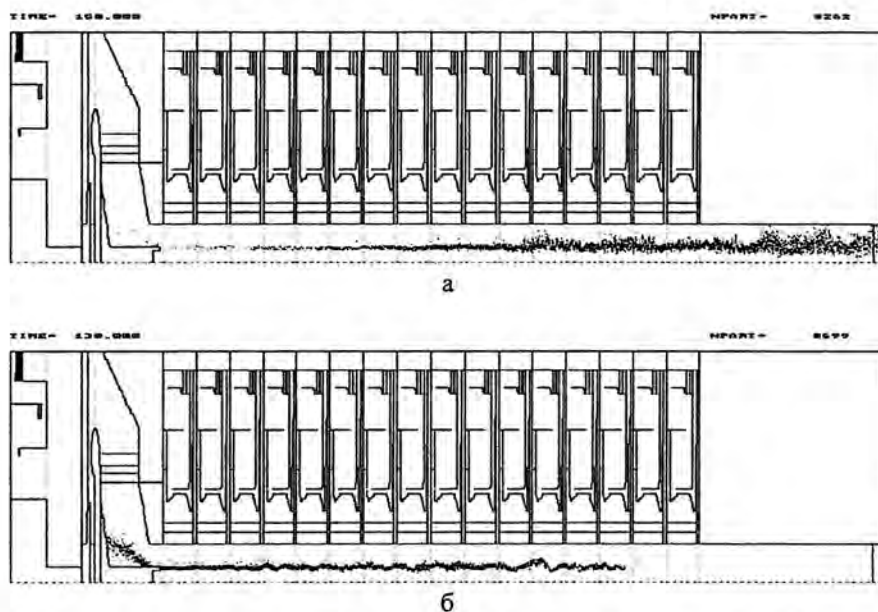


Рис. 7. Распределение частиц на плоскости  $r$ - $z$  (расчет 3): а –  $t = 130$  нс; б –  $t = 150$  нс

Амплитуда импульса тока пучка во всех сечениях  $\sim 36$  кА, длительность  $\sim 20$  нс (рис. 8). Заряд пучка на мишени  $6,4 \cdot 10^{-4}$  Кл, полная энергия частиц 13,7 кДж, что превышает соответствующие параметры для ускорителя с неоптимизированным катодом.

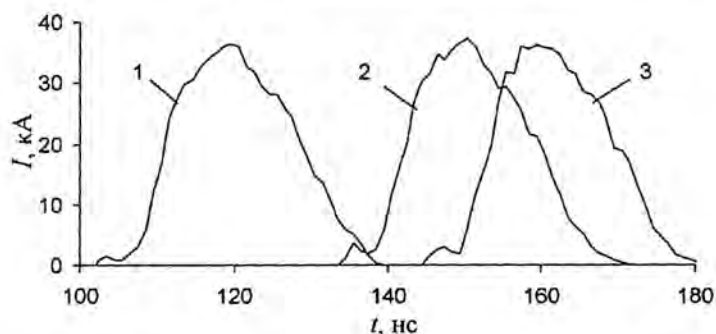


Рис. 8. Импульсы тока пучка в разных сечениях (расчет 3):

1 –  $z = 2,63$  м; 2 –  $z = 11,89$  м; 3 –  $z = 5,11$  м

На рис. 9 представлены потери заряда  $Q_L$  в секциях ускорителя для оптимизированного и неоптимизированного катодов с  $d_c = 80$  мм. Потери нормированы по отношению к инжектированному заряду  $Q_{inj}$ . Секции 1–16 соответствуют индукторам, секции 17–19 – секциям ТТ, секция 20 – ВУ. При работе с неоптимизированным катодом с  $U_D \approx 3$  МВ (1) потери заряда начинаются с 3-го индуктора, суммарные потери заряда на ускорительных трубках составляют 20 % от инжектированного, полные потери – 36 %. Для  $U_D \approx 2$  МВ потерь заряда в индукторах практически нет, основные потери приходятся на ТТ и ВУ (2), полные потери заряда 10 %. При работе с оптимизированным катодом с  $U_D \approx 3$  МВ потери заряда в индукторах отсутствуют, основные потери в последней секции ТТ (3), полные потери заряда  $\sim 1,5$  % от инжектированного.

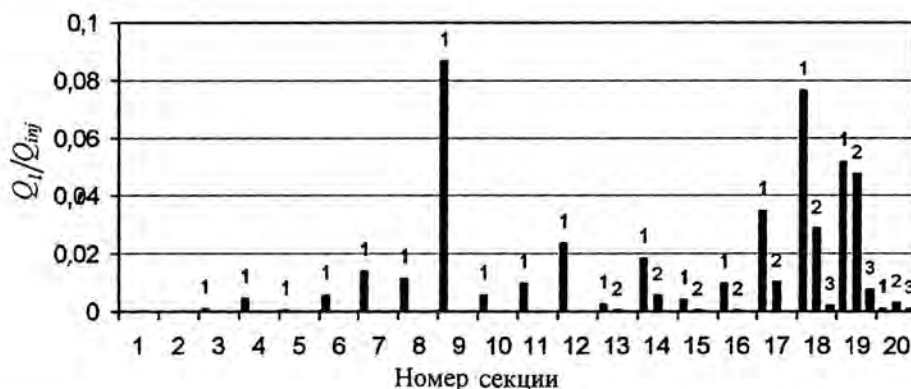


Рис. 9. Потери заряда в секциях ускорителя: 1 – расчет 1; 2 – расчет 2; 3 – расчет 3

Проведены расчеты ускорителя с оптимизированным катодом с  $d_c$  от 40 до 120 мм с шагом 20 мм (рис. 10). Для катодов с диаметром до 100 мм основные потери заряда приходятся на стенки ТТ и ВУ. Для катода с диаметром 120 мм потери на секционированных изоляторах индукторов составляют 5 % от инжектированного заряда, и они приходятся на последние индукторы ускорите-

ля. Полные потери составляют ~ 42 % от инжектированного заряда. Для ускорения пучка с диаметром 120 мм необходимо оптимизировать распределение магнитного поля в ускорителе. Для сравнения на этих рисунках приведены потери заряда в ускорителе с неоптимизированным катодом.

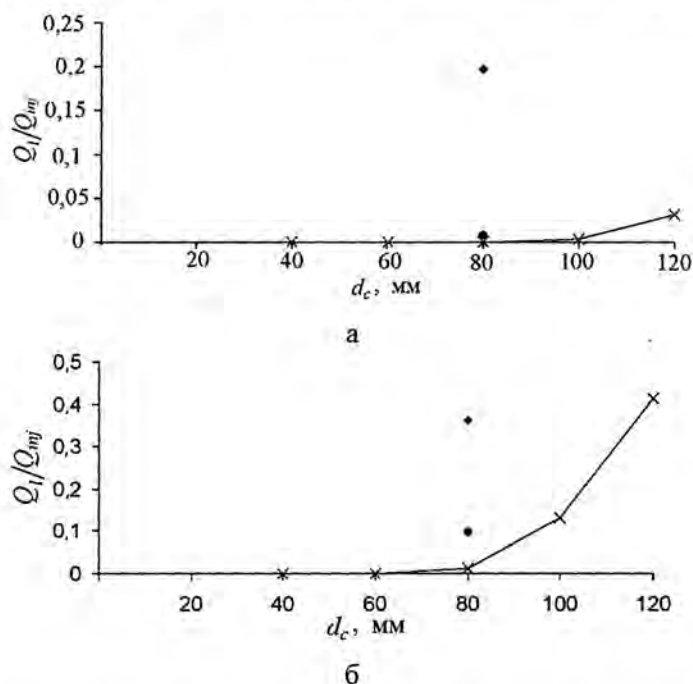


Рис. 10. Потери заряда на ускорительных трубках (а), полные потери (б): расчет 1 (♦); расчет 2 (•); оптимизированный катод (×)

Основной вклад в потери заряда пучка при работе с оптимизированным катодом вносят тракт транспортировки и выводное устройство. Поэтому необходима модернизация этих узлов ускорителя, с целью оптимизации распределения магнитного поля в них.

### Список литературы

1. Bossamykin V. S., Gordeev V. S., Pavlovskii A. I. et al. Linear induction accelerator LIA-10M // Proc. 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM. 1993. Vol. 2. P. 905–907.
2. Гордеев В. С., Мысков Г. А., Филиппов В. О. и др. Результаты исследований ускорителя ЛИУ-10М // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. Т. 5. С. 176–181.
3. Gordeev V. S., Mikhailov E. S. BEAM25 program for numerical simulation of the processes of high-current electron beams shaping, acceleration and transportation // Problems of atomic science and technology. Series "Nuclear Physics Investigations". 2001. N 5 (39). P. 30–32.
4. Молоковский Д. И., Сушков А. Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. М: Энергоатомиздат, 1991.

## Optimization of Parameters of Electron Beam in LIA-10M

V. S. Gordeev, I. V. Viktorov, E. S. Mikhailov, G. A. Myskov, I. V. Parshina

*Numerical calculations of the accelerator LIA-10M were carried out. It is shown that at the existing configuration of the diode unit and maximal for LIA-10M injection parameters (3 MeV, 50 kA) significant (up to 40 %) beam losses in the accelerating channel are possible. As a result of calculations there is optimized the injector cathode geometry what was permit to avoid beam electron leakage onto accelerating channel walls as well as to significantly improve out parameters of LIA-10M.*