

УДК 621.384.633.5/6

## ИНЖЕКТОР ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЭЛСИ

*Н. И. Балалыкин, Е. В. Болтушкин, В. В. Кобец, И. Н. Мешков,  
И. А. Селезнев, Г. Д. Ширков, М. В. Юрков*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Проект ДЭЛСИ (Дубненский Электронный Синхротрон), разрабатываемый в Объединенном институте ядерных исследований, базируется на ускорительном оборудовании NIKHEF, Амстердам, переданном в ОИЯИ [1]. Частью этого оборудования является линейный ускоритель электронов линак-800 на энергию 800 МэВ. В данном докладе приведены результаты оптимизации характеристик высокопоточного субгармонического инжектора для линака-800. Установка этого инжектора делает возможным создание комплекса лазера на свободных электронах (ЛСЭ), перекрывающего диапазон спектра излучения от инфракрасного до ультрафиолетового.

DELSY project (Dubna ELeCtron SYnchrotron) is under development at the Joint Institute for Nuclear Research. It is based on the accelerator facility donated to JINR by NIKHEF, Amsterdam [1]. This facility includes a linear electron accelerator (linac-800) and the storage ring. It is planned to upgrade accelerator linac-800 with a high current injector which will allow one to drive a complex of free electron lasers covering the wavelength range from far infrared down to ultraviolet. This report presents results of optimization of the high current subharmonic injector for linac-800.

### ВВЕДЕНИЕ

Для эффективной работы ЛСЭ требуются электронные пучки с большим пиковым током, малым эмиттансом и малым энергетическим разбросом. Существует несколько типов инжекторов, позволяющих формировать электронные пучки с требуемыми параметрами. Инжекторы на базе ВЧ-пушки с фотокатодом успешно продемонстрировали возможность получения пучков с пиковым током до 100–200 А, величиной нормализованного эмиттанта до  $1 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  и энергетическим разбросом несколько кэВ [2–4]. Хотя такой инжектор может рассматриваться как идеальный, он является технически сложным и дорогостоящим устройством. На комплексах ЛСЭ также используются ВЧ-пушки с термокатодом и альфа-магнитом [5, 6], формирующие пучки с пиковым током в несколько десятков ампер, нормализованным эмиттансом до  $7 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  и малым энергетическим разбросом. Недостаток такого инжектора состоит в ограниченных возможностях управления длиной пучка и пиковым током. Значительное распространение на комплексах ЛСЭ получили инжекторы на основе электронной пушки с термокатодом и субгармонического группирователя [7–10]. Типичные параметры пучка из субгармонического инжектора, используемого в комплексах ЛСЭ: заряд 1 нКл, нормализованный эмиттанс (20–30)  $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ , энергетический разброс 150–200 кэВ. Экспериментально продемонстрировано, что этого достаточно для перекрытия диапазона работы ЛСЭ от дальнего инфракрасного до ультрафиолетового. Принимая во внимание доступность технологии изготовления и сравнительно низкую стоимость подобных устройств, решили

использовать субгармонический инжектор в фазе 1 проекта ДЭЛСИ. В данной работе представлены предварительные результаты оптимизации субгармонического инжектора для линака-800.

### КОНСТРУКЦИЯ ИНЖЕКТОРА

Субгармонический инжектор [11] состоит (рис. 1) из электронной пушки, ускорительной трубки, субгармонического четвертьволнового резонатора (предгруппирователя) и ускоряющей секции на бегущей волне (группирователя). Предгруппирователь и груп-

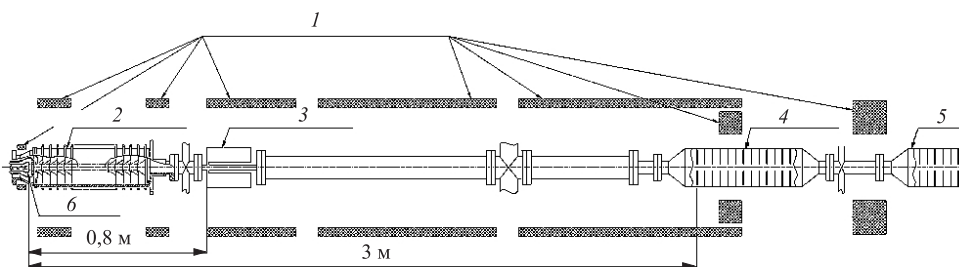


Рис. 1. Схема субгармонического инжектора для линака-800: 1 — фокусирующие обмотки; 2 — ускорительная трубка; 3 — субгармонический группирователь; 4 — группирователь на бегущей волне; 5 — вход в линак; 6 — электронная пушка

пирователь разделены дрейфовым промежутком. Электронный пучок формируется в трехэлектродной пушке с управляющей сеткой. Управляющая сетка выполнена в форме сферы (рис. 2). Такая геометрия позволяет формировать распределение плотности тока по радиусу, близкое к гауссову (рис. 3). Результаты моделирования показывают, что формирование пучка с таким распределением плотности тока по радиусу позволяет уменьшить поперечные размеры пучка внутри ускорительной трубки, и, как следствие, позволяет поднять максимальный ток от 2,5 до 3,5 А, при сохранении эмиттанса в требуемом диапазоне. Открывающий потенциал на управляющей сетке длительностью 0,5 нс обеспечивается импульсным генератором с напряжением до 2 кВ. На выходе ускорительной трубки электроны имеют энергию 350 кэВ, длина сгустка составляет 13 см. Сгусток поступает в предгруппирователь, который представляет собой четвертьволновый резонатор с зазором 1 см и напряжением на зазоре до 100 кВ. Резонатор работает на шестой гармонике основной частоты линак,  $f = 476$  МГц. При пролете через резонатор сгусток приобретает коррелированный дрейф энергии вдоль сгустка:

$$\Delta\varepsilon = \pm eV_0 \sin \Omega t, \quad \Omega = 2\pi f,$$

где  $V_0$  и  $f$  — амплитуда и частота ВЧ-напряжения субгармонического резонатора. Фаза влета сгустка в резонатор выбирается таким образом, чтобы голова сгустка теряла, а хвост приобретал энергию. После выхода из субгармонического резонатора сгусток проходит дрейфовый промежуток длиной 2,2 м, где он сжимается до продольных размеров

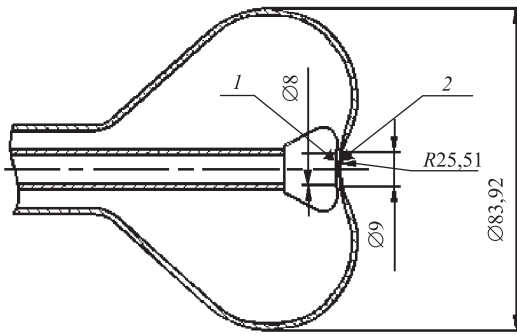


Рис. 2. Схема электронной пушки с управляющей сеткой в форме сферы: 1 — термокатод; 2 — сетка

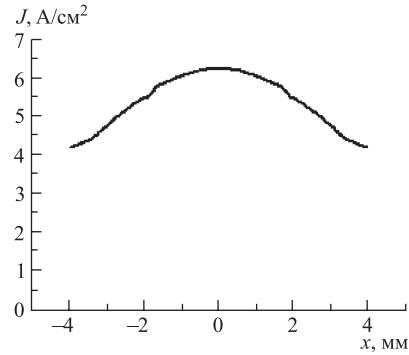


Рис. 3. Распределение плотности тока по радиусу на катоде

$\sigma_l \approx 6$  мм (рис. 4, б). Дальнейшее сжатие и ускорение сгустка происходит в группирователе. Группирователь представляет собой секцию диафрагмированного волновода на бегущей волне со структурой типа  $2\pi/3$ , работающего на основной частоте линака  $f = 2856$  МГц. Диафрагмированный волновод состоит из 12 ячеек и имеет длину

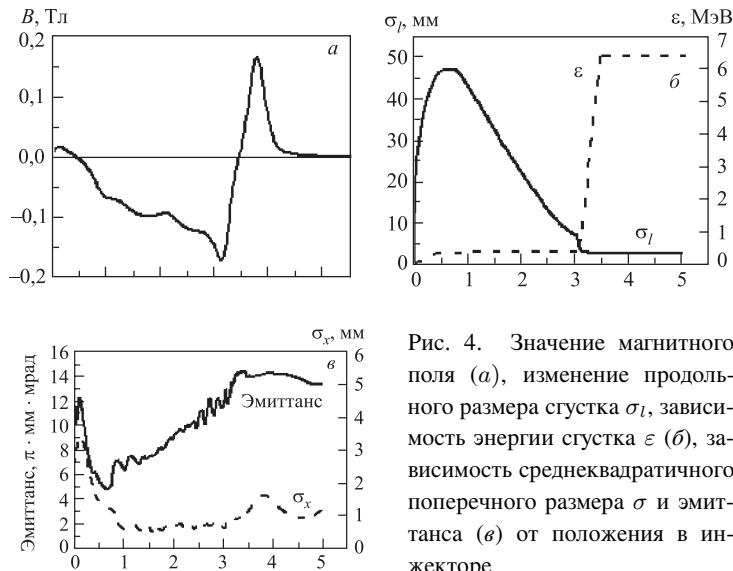


Рис. 4. Значение магнитного поля (а), изменение продольного размера сгустка  $\sigma_l$ , зависимость энергии сгустка  $\epsilon$  (б), зависимость среднеквадратичного поперечного размера  $\sigma$  и эмиттанса (в) от положения в инжекторе

42 см. Амплитуда ускоряющего поля в волноводе может подниматься до 40 МВ/м. В конструкции инжектора предполагается установка двух охлаждаемых диафрагм: перед субгармоническим резонатором (для обрезания гало пучка) и на выходе группирователя (для сбора электронов, не попавших в сепаратрису).

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНЖЕКТОРА

Требования к параметрам сгустка приведены в таблице. Расчет магнитных и электрических полей производился кодом SAM [12]. Моделирование динамики частиц в инжекторе осуществлялось программным кодом ASTRA, разработанным в DESY. ASTRA моделирует динамику частиц в шестимерном фазовом пространстве с учетом про-

Технические требования на параметры инжектора линак-800 [13]

|   |                |
|---|----------------|
| Заряд в сгустке, нКл  | 0,9–1,0        |
| Пиковый ток, А  | 50–70          |
| Среднеквадратичная длина сгустка, мм                              | 2,0–3,0        |
| Нормализованный эмиттанс, $\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ | $< 30$         |
| Среднеквадратичный разброс по энергии, кэВ                        | $< 150$        |
| Частота следования микроимпульсов, МГц                            | 19,8/39,7/59,5 |
| Длительность макроимпульса, мкс                                   | 5–10           |
| Частота повторения макроимпульсов, Гц                             | 1–100          |

странственного заряда. Внешние поля задаются в аксиально-симметричном приближении. Получение каждого из требуемых параметров сгустка в отдельности не представляет сложности, однако получение сгустков одновременно с малым эмиттансом и энергетическим разбросом и большим пиковым током является сложной физической и технической проблемой. Для получения пучка с малым эмиттансом выбрана схема электронной пушки с незамагниченным катодом и сопровождающим магнитным полем. Значение поля дается условием «бриллюэновского потока».

$$B_s[\text{Тл}] = 3,69 \cdot 10^{-5} (I[\text{А}] / \beta\gamma)^{1/2} / r[\text{м}].$$

Сопровождающее магнитное поле (рис. 4, а) сформировано катушками (рис. 1). Оптимизация магнитного поля вдоль инжектора позволяет получать сгустки с нормализованным эмиттансом до  $20 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$  (рис. 4, в). Такие параметры сгустка получаются при полном захвате всех частиц в сепаратрису ускоряющей секции-группирователя, и, как результат, мы получаем пиковый ток в сгустке (рис. 5, б), заметно превышающий требуемую величину [13]. Отметим, что для эффективной работы ЛСЭ важны не только высокий пиковый ток, малые эмиттанс и энергетический разброс, но и длина сгустка. В частности, для эффективной работы ЛСЭ-генератора длина сгустка должна быть достаточно большой,  $l \geq \lambda n_u$ , где  $\lambda$  — длина волны излучения,  $n_u$  — число периодов ондулятора. Для работы ЛСЭ в дальней инфракрасной области требуется сгусток длиной более 3 мм. Работа ЛСЭ в более коротковолновом диапазоне может быть более оптимальной при укороченном сгустке, но с большим пиковым током.

Распределение тока вдоль сгустка крайне неоднородно (рис. 5). Численное моделирование показывает, что интенсивная головная часть сгустка содержит около 80 % частиц. Поэтому средний ток сгустка определим далее как

$$I = \frac{cQ}{2\sigma_z}, \quad (1)$$

где  $\sigma_z$  — среднеквадратичный размер головной части сгустка. При выбранных параметрах инжектора можно управлять длиной сгустка в пределах от 0,7 до 3 мм и пиковым током в пределах 50–400 А. Это делается с помощью соответствующих настроек фаз

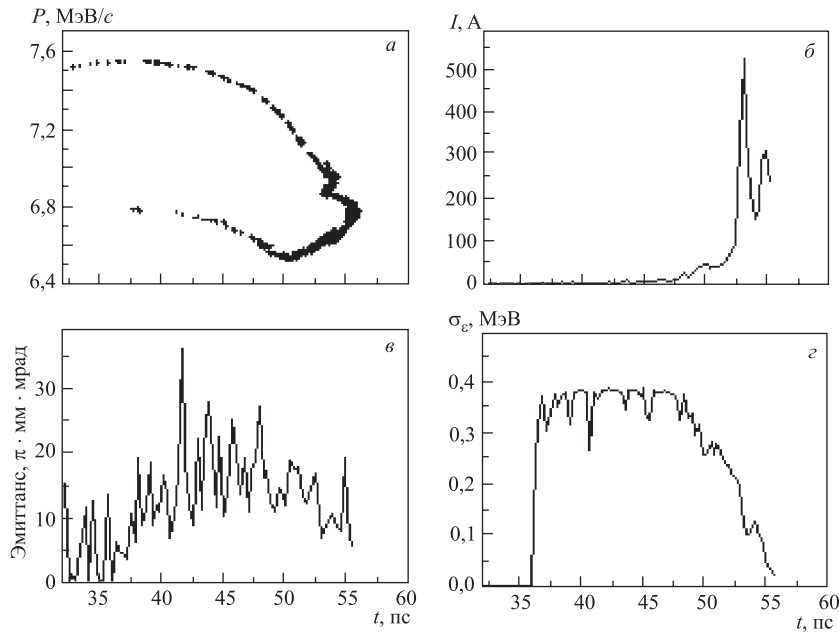


Рис. 5. Характеристика короткого сгустка с полным захватом всех частиц в сепаратрису. а) Распределение частиц на фазовой плоскости; б) ток; в) локальный эмиттанс; г) локальный среднеквадратичный разброс энергии

субгармонического резонатора и группирователя. Анализ эволюции частиц в фазовом пространстве позволяет определить значения фаз ВЧ-резонатора и секции группирователя, при которых получается эффективное сжатие сгустка. Нижний предел на длину сгустка определяется началом сильной фрагментации сгустка в фазовом пространстве. Рабочий диапазон фаз резонатора и группирователя определяется из условия отсутствия заметной перегруппировки частиц. Диапазон изменения фазы субгармонического резонатора составляет от  $-35$  до  $-25^\circ$ . При такой настройке фазы центр группировки смещен к головной части сгустка. Это позволяет уменьшить количество частиц, находящихся перед ядром сгустка. Именно эти частицы перегруппировываются в секции группирователя и создают область с большим локальным среднеквадратичным разбросом по энергии. Для этого распределения (рис. 6) получаем  $\sigma_z \approx 2,8$  мм и ток  $I \approx 96$  А. Заметим, что при такой настройке не все частицы захватываются в сепаратрису вследствие слабой группировки хвостовой части сгустка. Потери электронов, не попавших в сепаратрису, составляют около 10% от полного заряда сгустка. В данном случае заряд ядра сгустка (80% частиц) 0,9 нКл, заряд всего сгустка равен 1,12 нКл, если инжектируется 1,2 нКл. Электроны, не попавшие в сепаратрису, ускоряются до меньшей энергии и, пока они находятся внутри секции группирователя, удерживаются продольным магнитным полем.

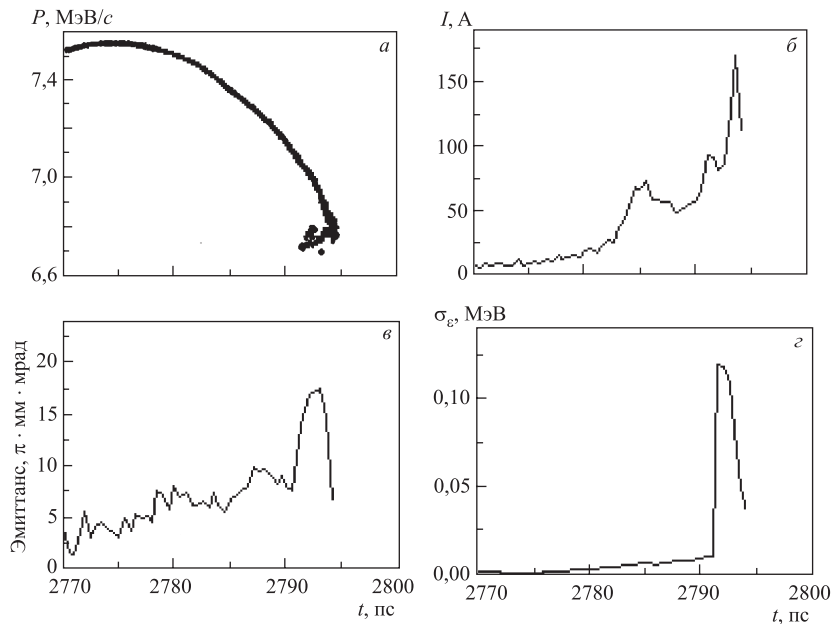


Рис. 6. Характеристики длинного сгустка. а) Распределение частиц на фазовой плоскости; б) ток; в) локальный эмиттанс; г) локальный среднеквадратичный разброс энергии

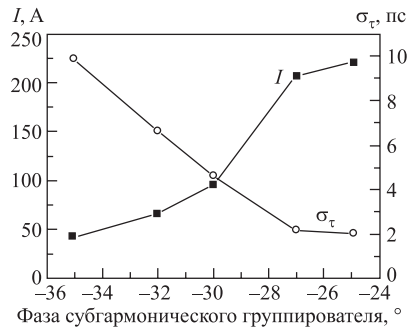


Рис. 7. Зависимость продольного размера сгустка  $\sigma_\tau$  и тока  $I$  от фазы ВЧ субгармонического резонатора. Амплитуда ВЧ субгармонического резонатора равна 4,2 кВ, фаза ВЧ группирователя равна  $220^\circ$

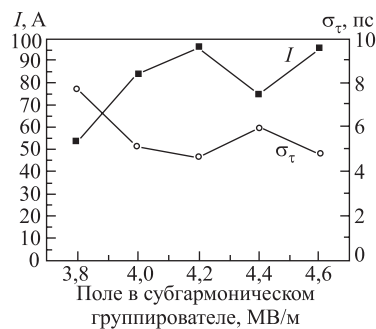


Рис. 8. Зависимость продольного размера сгустка  $\sigma_\tau$  и тока  $I$  от амплитуды ВЧ в субгармоническом резонаторе. Фаза ВЧ субгармонического резонатора равна  $-30^\circ$ , фаза ВЧ группирователя равна  $220^\circ$

Эволюция параметров сгустка исследовалась варьированием параметров: субгармонического группирователя — фазы ВЧ (рис. 7) и амплитуды ВЧ (рис. 8) и фазы ВЧ (рис. 9) группирователя на бегущей волне. При этом за основу были взяты параметры инжектора, при которых получается результат, представленный на рис. 6. При беглом взгляде на

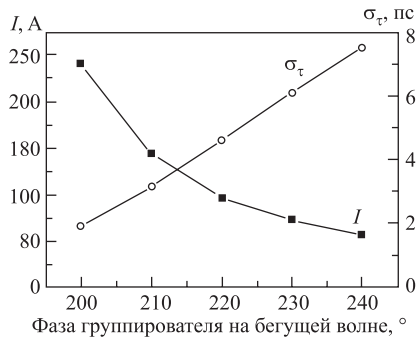


Рис. 9. Зависимость продольного размера сгустка  $\sigma_\tau$  и тока  $I$  от фазы ВЧ в группирователе. Амплитуда ВЧ субгармонического резонатора равна 4,2 кВ, фаза ВЧ субгармонического резонатора равна  $-30^\circ$

рис. 8 складывается впечатление, что увеличение амплитуды ВЧ приводит к увеличению тока в сгустке, однако анализ распределения частиц на фазовой плоскости показывает, что с ростом амплитуды происходит перегруппировка сгустка. Возникает область, где продольный разброс по импульсу из-за пространственного заряда становится сравнимым с модуляцией импульса электронов в субгармоническом резонаторе. Таким образом, частицы, находящиеся в передней части ядра сгустка, получают дополнительный импульс, направленный по ходу движения. Частицы, находящиеся в голове сгустка, заметно слабее чувствуют пространственный заряд ядра, и их положение на фазовой плоскости меняется слабее. Хвост ядра сгустка получает тормозящий импульс, хвост же самого сгустка практически не чувствует действия пространственного заряда ядра и остается без видимых изменений. Как следствие этого центральная часть сгустка

разворачивается на фазовой плоскости и имеет место перегруппировка. В итоге в сгустке образуются две фракции, отстоящие друг от друга на расстоянии около 5 пс (рис. 10). Параметры сгустка, полученные в этом случае, нельзя считать оптимальными, и оценка

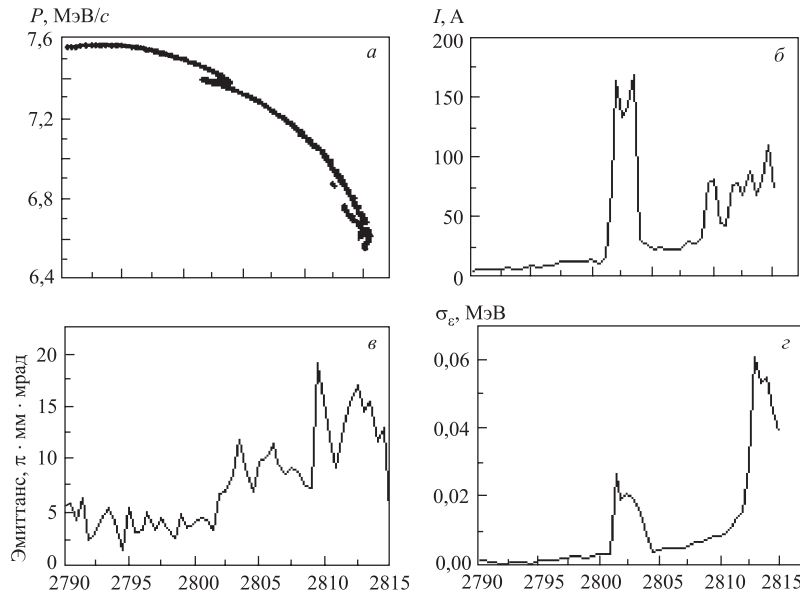


Рис. 10. Характеристика длинного сгустка с ярко выраженной фрагментацией сгустка. а) Распределение частиц на фазовой плоскости; б) ток; в) локальный эмиттанс; г) локальный среднеквадратичный разброс энергии

длины и тока для ступка с таким распределением, сделанная по формуле (1), не имеет физического смысла.

В проекте ДЭЛСИ предполагается получение макроимпульса длительностью 5–10 мкс (таблица) с общим числом микроимпульсов в нем более 100. Во время макроимпульса параметры ступка должны оставаться в пределах  $\sigma_\tau \geq 4$  пс,  $I \geq 50$  А. Анализ данных, представленных на рис. 7–9, позволяет сделать оценку требуемой точности синхронизации импульса, открывающего пушку:  $10^\circ$  по фазе ВЧ группирователя, или  $3^\circ$  по фазе резонатора, что дает значение  $\Delta\tau \approx \pm 10$  пс.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показывают, что выбранная схема субгармонического инжектора позволяет формировать ступки электронов с параметрами, удовлетворяющими требованиям проекта ДЭЛСИ [13]. Инжектор позволяет управлять длиной ступка в диапазоне от 0,7 до 3 мм с изменением пикового тока при этом от 400 до 50 А. Во всем рабочем диапазоне эмиттанс остается в пределах менее  $20 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ , среднеквадратичный разброс энергии менее 150 кэВ вплоть до значения тока 150 А.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arkhipov V.A. et al. Project of the Dubna Electron Synchrotron // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 467. P. 57.
2. Schreiber S. The RF-gun based injector for the tesla test facility linac // Proc. EPAC. 1998. P. 1462.
3. Limberg T. Design and performance simulation of the TTF-FEL II bunch compression system // Proc. EPAC. 2002. P. 811.
4. Yu L.H. et al. First lasing of a high-gain harmonic generation free-electron laser experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 445. P. 301–306.
5. Lumpkin A.H. Utilization of CTR to measure the evolution of electron-beam microbunching in a self-amplified spontaneous emission (SASE) free-electron laser (FEL) // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 475. P. 462–469.
6. Yokoyama M. et al. Accelerator design of the KHI FEL device // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 429. P. 269–275.
7. Tomimasu T. et al. Linac-based UV-FEL macropulse shape and gain estimate at the FELI // Ibid. P. 141–145.
8. Tomimasu T. et al. Strong focusing system of FELI 6-MeV electron injector used for ultraviolet FEL oscillations // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 407. P. 370.
9. Nishimori N. et al. Improved performance of the JAERI injection and free electron laser system // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 445. P. 432–436.
10. Kato R. et al. Lasing at  $150 \mu\text{m}$  wavelength and measurement of the characteristics of the free-electron laser at ISIR, Osaka University // Ibid. P. 169–172.



62 Балалыкин Н.И. и др.

11. Балалыкин Н.И. и др. Инжектор линейного ускорителя для накачки лазеров на свободных электронах (проект ДЭЛСИ) // АЭ. 2003. Т. 94, вып. 1. С. 42.
12. Fomel B. M., Tiunov M. A., Yakovlev V. P. SAM — an interactive code for evaluation of electron guns. Preprint Budker INP 96-11. Novosibirsk, 1996.
13. Arzumaniyan G. et al. Phase 1: Free Electron Laser. Conceptual Design Report. Joint Institute for Nuclear Research. Dubna Electron Synhrotron (DELSY). Dubna, 2001.