

**18-я РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО УСКОРИТЕЛЯМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
(Обнинск, октябрь 2002 г.)**

Секция «Источники синхротронного излучения»

УДК 621.384.633.5/6

ПРОЕКТ ДЭЛСИ — ДУБНЕНСКИЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ СИНХРОТРОН

*Балалыкин Н.И., Белошицкий П.Ф., Быковский В.Ф., Кадышевский В.Г., Кобец В.В.,
Мешков И.Н., Морозов Н.А., Селезнев И.А., Сидоров Г.И., Сисакян А.Н.,
Сыресин Е.М., Титкова И.В., Ширков Г.Д., Юрков М.В. (ОИЯИ)*

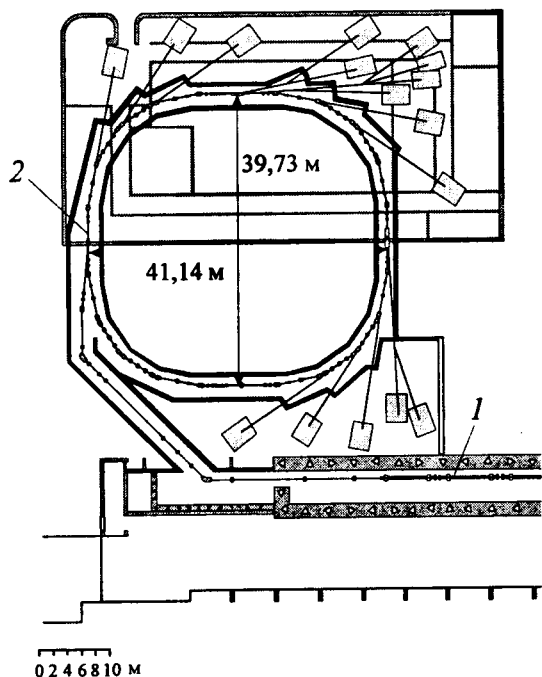
В ОИЯИ создается ускорительный комплекс ДЭЛСИ (Дубненский электронный синхротрон), включающий в себя накопитель электронов на энергию 1,2 ГэВ — источник синхротронного излучения высокой яркости, линейный ускоритель-инжектор и семейство лазеров на свободных электронах в широком спектральном диапазоне — от инфракрасного ($\lambda \approx 100$ мкм) до высокоэнергетического рентгеновского излучения ($\epsilon_\omega \approx 50$ кэВ). Источник ДЭЛСИ даст возможность расширить исследования по физике конденсированных сред и атомной физике, биологии и медицине, кристаллографии и рентгеновской спектроскопии, ядерной физике и метрологии. Проект имеет три фазы, которые выбраны из соображений его максимально быстрой реализации в условиях ограниченного финансирования с тем, чтобы пользователи уже в ближайшее время получили доступ к источникам излучения:

фаза I — монтаж и пуск линейного ускорителя, сооружение лазера на свободных электронах от инфракрасного до ультрафиолетового диапазона на базе пучка электронов линейного ускорителя Линак-800;

фаза II — строительство накопителя электронов;

фаза III — создание лазера на свободных электронах рентгеновского диапазона на базе пучка электронов линака.

Комплекс ДЭЛСИ создается на базе оборудования ускорительного комплекса Национального института ядерной физики и физики высоких энергий НИКНЕФ (Амстердам, Нидерланды), который по соглашению между НИКНЕФ и ОИЯИ в 1999 г. был демонтирован и передан в Дубну. Ускорительный комплекс НИКНЕФ включает в себя электронный линейный ускоритель МЕА на энергию электронов 700 МэВ и накопительное кольцо AmPS с максимальной энергией электронов 900 МэВ при токе накопленного пучка 200 мА. В проекте ДЭЛСИ линейный ускоритель, названный Линак-800 (рис. 1), планируется использовать не только для создания комплекса лазеров на свободных электронах, но и в режиме накопления.



Р и с. 1. Схема комплекса ДЭЛСИ: 1 — линейный ускоритель Линак-800; 2 — накопительное кольцо

в настоящее время в нем заканчиваются подготовительные работы для размещения ускорителя. Для сооружения комплекса лазеров на свободных электронах со следующими характеристиками [1]:

Спектр излучения, мкм . . .	20—150	5—30	1—6	0,15—1,2
Пиковая мощность, МВт . . .	1—5	1—5	3—15	10—20
Энергия микроимпульса, мкДж . . .	50—200	25—100	25—100	50—100
Длительность микроимпульса, пс . . .	10—30	10	10	3—5
Ширина спектра, % . . .	0,2—0,4	0,6	0,6	0,6
Частота повторения микроимпульсов, МГц . . .			19,8/39,7/59,5	
Длительность макроимпульса, мкс . . .			5—10	
Частота повторения, Гц . . .			1—100	
Средняя мощность, Вт . . .			0,2—1	

необходимо изготовить новый инжектор с параметрами:

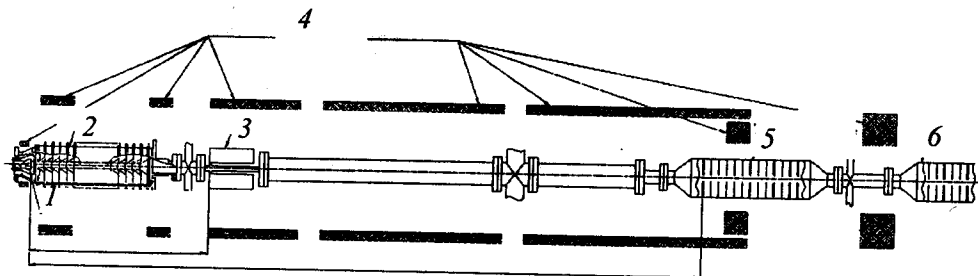
Заряд в сгустке, нКл . . .	0,9—1,0
Пиковый ток, А . . .	50—70
Среднеквадратичная длина сгустка, мм . . .	2—3
Нормализованный эмиттанс, π -мм-мрад . . .	< 30
Среднеквадратичный разброс по энергии, кэВ . . .	< 150
Частота следования микроимпульсов, МГц . . .	19,8/39,7/59,5
Длительность макроимпульса, мкс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

Принимая во внимание доступность технологии изготовления и сравнительно низкую стоимость, было принято решение в фазе I проекта использовать субгармо-

При этом число ускоряющих секций увеличится с 23 до 25 и будет форсирован режим работы ВЧ-генераторов. В результате можно будет повысить энергию электронов до 800 МэВ.

Накопитель электронов ДЭЛСИ планируется создать с использованием элементов кольца AmPS, изменив его оптику. Кольцо будет дополнено ондулятором с высокой яркостью и сверхпроводящим вигглером, генерирующим высокоэнергетическое рентгеновское излучение. Предполагается увеличить энергию электронов в ДЭЛСИ до 1,2 ГэВ путем модификации дипольных магнитов AmPS.

Фаза I. Реализация комплекса лазеров на свободных электронах не требует значительных изменений инфраструктуры ОИЯИ. Линак-800 может быть размещен в имеющемся здании, в

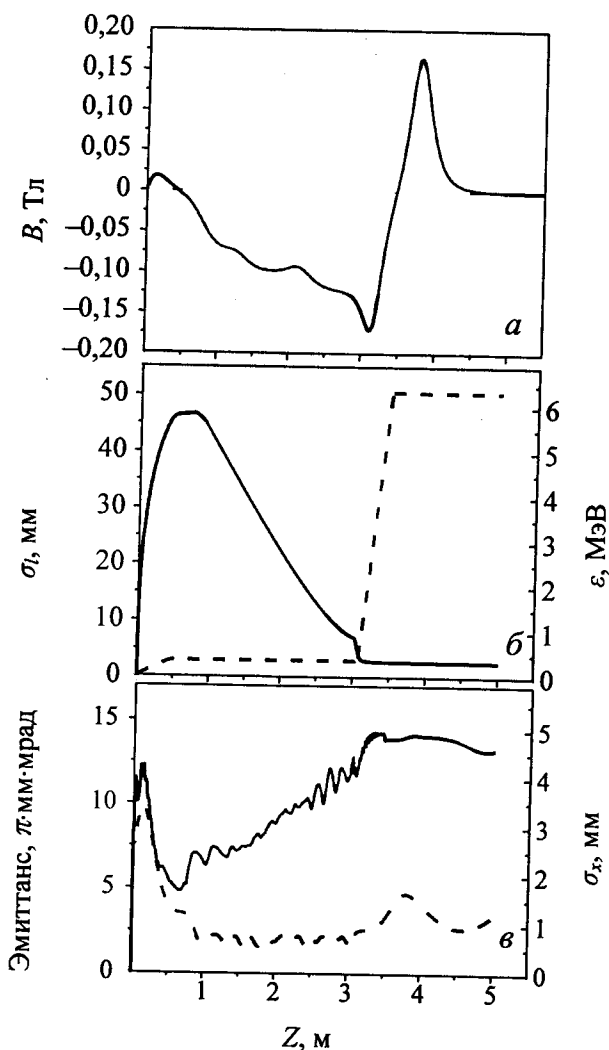


Р и с. 2. Схема субгармонического инжектора для Линака-800: 1 — электронная пушка; 2 — ускорительная трубка; 3 — субгармонический резонатор; 4 — фокусирующие катушки; 5 — секция группирователя; 6 — вход в ускоритель

нический инжектор, поскольку экспериментально показано, что такие инжекторы позволяют получать требуемые параметры пучка [2—4].

Субгармонический инжектор (рис. 2) состоит из электронной пушки, ускорительной трубки, субгармонического четвертьволнового резонатора (предгруппирователя) и ускоряющей секции на бегущей волне (группирователя). Для получения пучка с малым эмиттансом выбрана схема электронной пушки с немагнитным катодом и сопровождающим магнитным полем. Поле задается условием бриллюэновского потока $B_s = 3,69 \cdot 10^{-5} (I/\beta\gamma)^{1/2} / r$.

Сопровождающее магнитное поле (рис. 3, а) сформировано катушками. Оптимизация магнитного поля вдоль инжектора позволяет получать сгустки с нормализованным эмиттансом до 20π -мм-мрад (рис. 3, в). Предгруппирователь и группирователь разделены дрейфовым промежутком. Электронный пучок формируется в трехэлектродной пушке с управляющей сеткой. Открывающий потенциал на управляющей сетке длитель-



Р и с. 3. Распределение магнитного поля (а), изменение продольного размера и зависимость энергии сгустка от положения в инжекторе (б), зависимость среднеквадратичного поперечного размера и эмиттанса от положения в инжекторе (в)

ностью 0,5 нс обеспечивается импульсным генератором напряжением до 4 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 линака 476 МГц. При пролете через резонатор сгусток приобретает коррелированный дрейф энергии вдоль сгустка $\Delta\varepsilon = \pm eV_0 \sin\Omega t$; $\Omega = 2\pi f$, где V_0 , f — амплитуда и частота ВЧ-напряжения субгармонического резонатора.

Фаза влета сгустка в резонатор выбирается таким образом, чтобы его головная часть теряла, а хвостовая приобретала энергию. После выхода из субгармонического резонатора сгусток проходит дрейфовый промежуток длиной 2,2 м, где сжимается до продольных размеров $\sigma_l \approx 6$ мм (рис. 3, б). Дальнейшее сжатие и ускорение сгустка происходят в группирователе. Эволюция эмиттанса и поперечного размера представлена на рис. 3, в. Группирователь, представляющий собой секцию диафрагмированного волновода на бегущей волне со структурой типа $2\pi/3$, работает на основной частоте линака 2856 МГц. Диафрагмированный волновод состоит из 12 ячеек и имеет длину 42 см. Амплитуда ускоряющего поля в волноводе может повышаться 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). Инжектор, выполненный по такой схеме, позволяет управлять длиной сгустка от 0,7 до 3 мм и соответственно средним током в пределах 200—50 А [5].

Фаза II. Основные параметры накопительного кольца ДЭЛСИ без влияния встроенных устройств следующие:

Периметр, м . . .	136,04
Радиус кривизны траектории в поворотных магнитах, м . . .	3,3
Частота бетатронных колебаний (горизонтальная/вертикальная) . . .	9,44/3,42
Коэффициент расширения орбиты . . .	$5,03 \cdot 10^{-3}$
Хроматичность (горизонтальная/вертикальная) . . .	-22,2/-12,6
Ток накопленных электронов, мА . . .	300
Горизонтальный эмиттанс, нм . . .	11,4
Частота ускоряющего напряжения, МГц . . .	476
Равновесная длина электронного сгустка, мм . . .	8,67
Номер гармоники . . .	216
Потери на излучение за оборот в поворотных магнитах, кэВ . . .	55,7

Параметры синхротронного излучения из поворотных магнитов ДЭЛСИ позволяют реализовать широкую программу исследований [6—8].

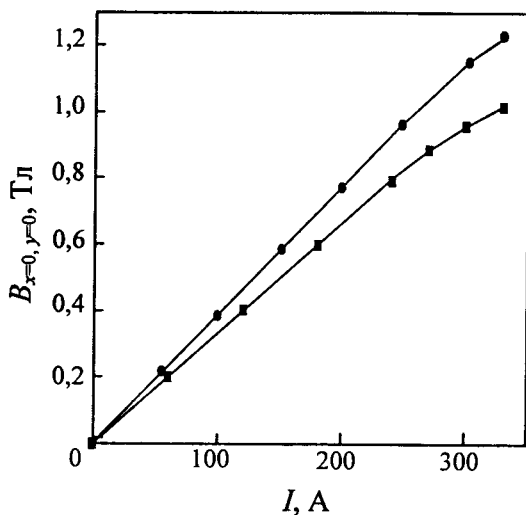
При максимальном накопленном токе пучка полное время жизни, ограниченное эффектом Тушека и вакуумными условиями, составляет 4,5 ч при связи поперечных колебаний 1% и давлении в вакуумной камере $0,7 \cdot 10^{-7}$ Па. При увеличении связи колебаний до 10% полное время жизни возрастает до 10 ч. При включении вигглера эффект Тушека ослабевает, поэтому время жизни пучка возрастает до 10 ч при связи поперечных колебаний 1%. При включении только ондулятора вертикальный аксептанс уменьшается до 5 мм-мрад, полное время жизни пучка — до 4,2 ч.

Разработка модифицированных дипольных магнитов для накопительного кольца комплекса ДЭЛСИ. Дипольные магниты накопителя электронов AmPS обеспечивали магнитное поле ~ 1 Тл при максимальном токе питания его обмоток 330 А (зазор между полюсами 45 мм). Для увеличения магнитного поля в дипольных магнитах для накопителя ДЭЛСИ (при использовании того же максимального тока питания) предполагается их существенная модификация. Для выбора конфигурации полюса модифицированного дипольного магнита был спроектирован и изготовлен тестовый магнит, на котором была подобрана необходимая геометрия полюса. Модификация полюса заключалась в уменьшении межполюсного зазора до 38 мм и изменении формы полюса для дополнительной концентрации магнитного потока.

Для проведения измерений и формирования магнитного поля дипольного магнита ДЭЛСИ был собран стенд для измерений путем снятия полной карты поля с помощью датчика Холла, а также путем определения изменения продольного интеграла магнитного поля индукционным методом. Требуемая относительная однородность интеграла магнитного поля $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ достигнута в горизонтальной рабочей апертуре ± 30 —40 мм (рис. 4). При формировании магнитного поля диполя широко использовались расчеты с помощью двумерной программы SUPERFISH [9] и трехмерной RADIA [10].

Выводы. Результаты моделирования показывают, что выбранная схема субгармонического инжектора позволяет формировать сгустки электронов с параметрами, удовлетворяющими требованиям проекта ДЭЛСИ. Инжектор позволяет управлять в необходимом диапазоне длиной сгустка и средним током. В рабочем диапазоне локальный эмиттанс остается в пределах менее $20 \mu\text{м}\cdot\text{мрад}$, локальный среднеквадратичный разброс энергии меньше 150 кэВ до 150 А.

Накопительное кольцо ДЭЛСИ по своим параметрам относится к источникам синхротронного излучения третьего поколения. Магнитная структура кольца позволяет установить сильнополевой вигглер и мини-ондулятор. Динамическая апертура достаточна для эффективной инжекции и достижения необходимого времени жизни пучка.



Р и с. 4. Намагничивание модифицированного дипольного магнита ДЭЛСИ (●) и AmPS (■)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arzumanyan G., Balalykin N., Kobets V. Dubna electron synchrotron. Phase I: free electron laser, conceptual design report. Internal JINR Report, E9-2001-272, с. 6—73.
2. Tomimasu T. Strong focusing system of FELI 6-MeV electron injector used for ultraviolet FEL oscillations. — NIM A407, 1998, p. 370—377.
3. Nishimori N. Improved performance of the JAERI injection and free electron laser system. — Ibid., A445, 2000, p. 432—436.

4. Kato R. Lasing at 150 μm wavelength and measurement of the characteristics of the free-electron laser at ISIR, Osaka University. — *Ibid.*, p. 169—172.
5. Кобец В.В., Мешков И.Н., Пио Ф. и др. Инжектора линейного ускорителя для накачки лазеров на свободных электронах (проект ДЭЛСИ). — См. наст. вып., с. 42—45.
6. Балалыкин Н.И., Белошицкий П.Ф., Кадышевский В.Г. и др. Источник синхротронного излучения третьего поколения в ОИЯИ. — *Атомная энергия*, 2001, т. 91, вып. 4, с. 300—307.
7. Titkova I.V., Beloshitsky P.F., Meshkov I.N. Magnet lattice of the synchrotron radiation source DELSY. — In: Proc. EPAC-2000, 25—30 June, 2000, Vienna, Austria, p. 702—705.
8. Titkova I.V., Beloshitsky P.F., Meshkov I.N. Optics and dynamic aperture studies for synchrotron radiation source DELSY. — In: Proc. PAC-2001, 18—22 June, 2001, Chicago, USA, v. 4, p. 2821—2823.
9. Billen J., Young L. Poisson Superfish Documentation. LA-UR-96-1834.
10. Chavanne J., Chubar O., Elleaume P. RADIA, a 3D magnetostatic computer code. — In: Proc. IMM-12, ESRF, Grenoble, France, 2001.

УДК 621.384.633.5/6

ИНЖЕКТОР ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ДЛЯ НАКАЧКИ ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ (ПРОЕКТ ДЭЛСИ)

*Кобец В.В., Мешков И.Н., Селезнев И.А., Юрков М.В. (ОИЯИ),
Пио Ф. (DESY, Германия)*

Проект ДЭЛСИ разделен на три фазы [1], первая из которых включает в себя создание комплекса лазеров на свободных электронах на базе ускорителя Линак-800 [2]. Сегодня известно несколько типов инжекторов, позволяющих формировать электронные сгустки с требуемыми параметрами. Инжекторы на базе ВЧ-пушки с фотокатодом формируют сгустки пиковым током до 200 А, нормализованным эмиттансом до $1 \pi\text{ мм}\cdot\text{мрад}$ и энергетическим разбросом несколько кэВ [3, 4]. ВЧ-пушки с термокатодом и α -магнитом [5] формируют пучки пиковым током в несколько десятков ампер, нормализованным эмиттансом до $7 \pi\text{ мм}\cdot\text{мрад}$ и малым энергетическим разбросом. Значительное распространение получили также инжекторы на основе электронной пушки с термокатодом и субгармонического группирователя [6, 7] с типичными параметрами пучка: заряд 1 нКл, нормализованный эмиттанс $30 \pi\text{ мм}\cdot\text{мрад}$, энергетический разброс ~ 200 кэВ. Экспериментально показано, что этого достаточно для генерации излучения в диапазоне от инфракрасного до ультрафиолетового.

Моделирование инжектора. Для успешной генерации излучения в лазерах на свободных электронах необходимо сформировать сгусток электронов с параметрами, приведенными в работе [2]. Магнитные и электрические поля моделировали с помощью кода SAM [8], динамику частиц в инжекторе — ASTRA, разработанным в DESY. Результаты расчетов сравнивали с экспериментальными данными на тестовом ускорителе TESLA (DESY) и ATF (Брукхейвенская национальная лаборатория, США). Хорошее согласие расчетных и экспериментальных данных позволяет сделать заключение о высокой достоверности результатов, полученных с помощью программного кода ASTRA.

Для получения пучка с параметрами, удовлетворяющими требованиям проекта ДЭЛСИ, была выбрана схема электронной пушки с немагнитным катодом и