СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sharkov B.Yu., Koshkarev D.G., Churazov M.P. Heavy-ion fusion activities at ITEP. — NIM-A, 1998, v. 415, p. 20.
2. Katayama T., Ohtomo K., Inabe K. e.a. Muses Conceptual Design Report. RIKEN, 1999.
3. Boine-Frankenheim O., Hoffmann I. Scientific Report GSI. 1999, p. 195.
4. Iselin P.C., Jowett J., Pancin I., Adelmann A. MAD Version 9. — In: Proc. of EPAC-2000. Vienna, 2000, p. 1042.
5. Giovannozzi M., Scandale W., Todesco E. Prediction of long-term stability in large hadron colliders. — Beam Dynamics Newsletter, 1996, p. 12.
6. Todesko E., Giovannozzi M. Dynamic aperture estimates and phase space distortions in non-linear betatron motion. — Phys. Rev. E, 1996, v. 53, p. 4067.
7. Zenkevich P., Korolev A. Non-linear effects in high current beams. — In: Proc. of the 1st EPAC. Roma, 1988, p. 740.
8. Bolshakov A., Zenkevich, P., Katayama T. Code for Calculation of Dynamical Aperture with Account of Space Charge Effect and its Application to ACR Storage Ring. RIKEN-AF-AC-26, 2000.
9. Sacherer F. RMS envelope equations with space charge. — IEEE Trans. Nucl. Sci., 1971, v. Ns-18, p. 1105.
10. Ohtomo K. New ACR Lattice. — In: MUSES Seminar, 01.09.2000.
11. Большаков А.Е., Зенкевич П.Р. Динамическая апертура накопителя в проекте ТВН: Препринт ИТЭФ 26-00, 2000.
12. Zenkevich P., Bolshakov A., Hoffmann I. Electron Cooling Rates in High Current Storage Rings: Preprint ИТЭФ 23-00, 2000.

Поступила в Редакцию 4.05.01

УДК 621.384.633.5/.6

ИСТОЧНИК СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЯ В ОИЯИ

Балалыкин Н.И., Белошицкий П.Ф., Кадышевский В.Г., Кобец В.В., Мешков И.Н., Морозов Н.А., Сидоров Г.И., Сисакян А.Н., Сыресин Е.М., Титкова И.В., Ширков Г.Д., Юрков М.В. (ОИЯИ), Антохин Е.И., Воблый П.Д., Кулипанов Г.Н., Левичев Е.Б., Мезенцев Н.А., Скринский А.Н. (ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН), Михайлин В.В., Колобанов В.Н. (НИИЯФ МГУ), Люкс Г., Маас Р., ван Миддельков Г., Спелт Я. (NIKHEF, Нидерланды)

За последние 5 лет достигнуты значительные результаты в развитии источников синхротронного излучения третьего поколения. Вступили в строй большие накопительные кольца APS (США) и SPRING-8 (Япония), в стадии пуска накопитель SLS (Швейцария). В накопительном кольце ESRF (European Synchrotron Radiation Facility, Гренобль, Франция) яркость синхротронного излучения увеличена с 10^{18} до 10^{20} фотон/(с·мм^2·мрад^2·0,1% ш.п.). Столь высокая яркость достигается благодаря использованию ондуляторов, встроенных в накопительном кольце. В диапазоне энергии электронов от 0,5 до 3 ГэВ яркость синхротронного излучения, выходящего из поворотных магнитов, составляет $2\cdot10^{12}-5\cdot10^{15}$ фотон/(с·мм^2·мрад^2·0,1% ш.п.), из ондулятора — $3\cdot10^{18}$ фотон/(с·мм^2·мрад^2·0,1% ш.п.), из вигглера (для различных источников) — $3\cdot10^{12}-1{,}5\cdot10^{16}$ фотон/(с·мм^2·мрад^2·0,1% ш.п.). Размер электронного пучка в современных источниках синхротронного излучения близок к дифракционному пределу, при достижении которого уменьшение размера источника уже не повышает его яркость.

Ускорительный комплекс ДЭЛСИ (Дубненский электронный синхротрон) создается на базе ускорительного комплекса Национального института ядерной физики и физики высоких энергий NIKHEF (Амстердам, Голландия), который по соглашению между ними в 1999 г. был демонтирован и передан в Дубну [1]. Ускорительный комплекс NIKHEF включает в себя электронный линейный ускоритель MEA (Medium Energy Accelerator) на энергию электронов 700 МэВ и накопительное кольцо AmPS

(Amsterdam Pulse Stretcher) с максимальной энергией электронов 900 МэВ при токе накопленного пучка 200 мА. В проекте ДЭЛСИ линейный ускоритель МЕА планируется использовать в режиме накопления электронов, но при этом число ускоряющих секций будет увеличено 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. На накопительном кольце планируется установить две ВЧ-станции, одна из которых будет работать на частоте 476 МГц, другая на частоте линейного ускорителя 2856 МГц. Это позволит получать короткие электронные сгустки (2,5 мм) для временной модуляции интенсивности синхротронного излучения в широком диапазоне времени. Одним из возможных направлений дальнейшего развития комплекса может быть использование электронного пучка МЕА для лазеров на свободных электронах.

Основные параметры накопительного кольца ДЭЛСИ без влияния встроенных устройств следующие:

Периметр, м . . .	136,04
Радиус кривизны траектории в поворотных магнитах, м . . .	3,3
Горизонтальная/вертикальная частота бетатронных колебаний . . .	9,44/3,42
Коэффициент расширения орбиты . . .	$5{,}03\cdot10^{-3}$
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

Синхротронное излучение из поворотных магнитов и встроенных устройств накопительного кольца ДЭЛСИ. Параметры синхротронного излучения из поворотных магнитов ДЭЛСИ (рис. 1) позволяют реализовать широкую программу исследований по атомной, фотоэлектронной спектроскопии, люминесценции в области вакуумного ультрафиолетового излучения, физике рентгенолюминофоров и сцинтилляторов, флюоресцентной спектроскопии биологических объектов с высоким временным разрешением в области низкоэнергетического рентгеновского излучения. Для этого планируется создать восемь каналов синхротронного излучения. Будет создан метрологический канал для фотометрических измерений детекторов и дозиметров, применяемых во многих областях науки и техники, в том числе в космических исследованиях. Параметры синхротронного излучения из поворотных магнитов ДЭЛСИ таковы:

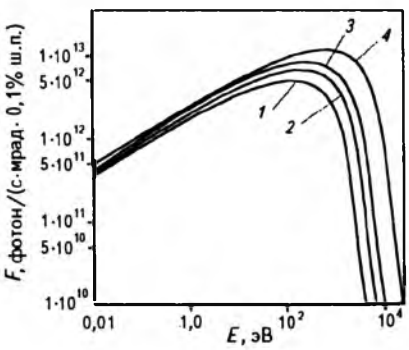
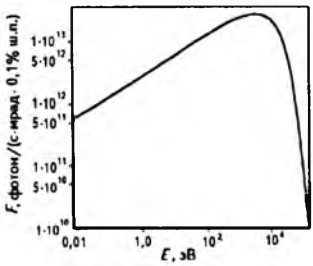


Рис. 1. Поток фотонов синхротронного излучения из поворотных магнитов ДЭЛСИ: *1—4* — энергия электронного пучка 0,8, 1, 1,2, 1,8 ГэВ соответственно

Энергия электронов, ГэВ . . .	1,8	1,2	1	0,8
Ток пучка, мА . . .	300			
Горизонтальный/вертикальный эмиттанс, нм . . .	25/0,25	11,43/0,114	7,72/0,078	4,94/0,049
Соотношение β-функций в точке излучения, м . . .	1,618/8,288			
Критическая энергия фотонов, кэВ . . .	6,46	1,16	0,80	0,51

Критическая длина волны, нм . . .	0,192	1,068	1,538	2,403
Полная мощность, кВт . . .	139,4	16,69	9,66	4,94
Угловая плотность мощности, Вт/мрад . . .	22,18	2,66	1,54	0,79
Поток фотонов, фотон/(с·мрад·0,1% ш.п.) . . .	$8,65\cdot10^{12}$	$5,77\cdot10^{12}$	$4,81\cdot10^{12}$	$2,53\cdot10^{12}$
Максимальная яркость, фотон/(с·мм^2·мрад^2·0,1% ш.п.) . . .		$3,3\cdot10^{14}$		

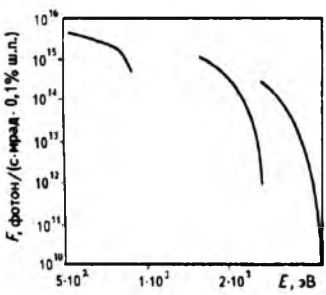


Р и с. 2. Поток фотонов из вигглера комплекса ДЭЛСИ

Спектр излучения из вигглера аналогичен спектру излучения из поворотного магнита, однако энергия фотонов здесь существенно выше (пропорциональна магнитному полю). Использование сверхпроводящего трехполюсного вигглера («шифтера») с напряженностью магнитного поля 10 Тл обеспечит генерацию высокоэнергетического рентгеновского излучения (рис. 2). Параметры синхротронного излучения из вигглера ДЭЛСИ следующие:

Энергия электронов, ГэВ . . .	1,2
Критическая энергия фотонов, кэВ . . .	9,58
Критическая длина волны, нм . . .	0,13
Полная мощность, кВт . . .	12,32
Плотность мощности, Вт/мм^2 . . .	639
Поток фотонов, фотон/(с·мрад·0,1% ш.п.) . . .	$1,73\cdot10^{13}$
Плотность потока, фотон/(с·мрад^2·0,1% ш.п.) . . .	$2,5\cdot10^{13}$
Максимальная яркость, фотон/(с·мм^2·мрад^2·0,1% ш.п.) . . .	$5,3\cdot10^{14}$
Параметр ондуляторности . . .	280,3

Будет создано шесть каналов для работы с высокоэнергетическим рентгеновским излучением из вигглера ДЭЛСИ. Оно будет использовано для структурных исследований биологических объектов с временным разрешением, рентгеновской микроскопии, исследования люминесцентных кристаллов и получения генерации твердотельных лазеров при накачке синхротронным излучением в области видимого ультрафиолетового излучения, исследований в области Мёссбауэровской спектроскопии с временным разрешением, EXAFS-спектроскопии, кристаллографии.



Р и с. 3. Зависимость потока фотонов (1-я, 3-я, 5-я гармоники) от энергии фотонов (изменяется при перестройке зазора ондулятора в интервале от 4 до 10 мм)

Особенность излучения из ондулятора — линейная поляризованность для заданной частоты излучения. Максимум мощности излучения достигается на первой гармонике, все четные гармоники подавлены. Изменяя зазор в ондуляторе или параметр ондуляторности, можно изменять поток синхротронного излучения (рис. 3). Параметры синхротронного излучения из ондулятора ДЭЛСИ таковы:

Энергия электронов, ГэВ . . .	1,2
Зазор ондулятора, мм . . .	5
Критическая энергия фотонов, кэВ . . .	0,64
Критическая длина волны, нм . . .	0,19
Поток фотонов, фотон/(с·мрад·0,1% ш.п.) . . .	$3,2\cdot10^{15}$
Плотность потока, фотон/(с·мрад^2·0,1% ш.п.) . . .	$6,3\cdot10^{17}$
Максимальная яркость, фотон/(с·мм^2·мрад^2·0,1% ш.п.) . . .	$1,97\cdot10^{19}$

На первом этапе планируется создание двух каналов для работы с излучением из ондулятора ДЭЛСИ. Излучение можно использовать для исследований в области метрологии и фотометрии, кристаллографии, рентгеновской голографии, для накачки твердотельных лазеров в области видимого ультрафиолетового излучения.

Структура и основные параметры накопительного кольца ДЭЛСИ. Магнитная структура ДЭЛСИ разработана, исходя из следующих общих требований:

использование магнитных элементов накопительного кольца AmPS;

достижение минимального эмиттанса при динамической апертуре, обеспечивающей эффективную инжекцию и высокое время жизни накопленных электронов;

максимальная яркость со встроенных устройств.

Для ДЭЛСИ была выбрана симметричная структура из четырех квадрантов [2]. В качестве базового выбран вариант, в котором квадрант состоит из элемента периодичности, согласующей ячейки, прямолинейного промежутка для встроенных устройств, согласующей ячейки, элемента периодичности. Квадрант является ахроматом. Набеги фаз бетатронных колебаний в элементе периодичности равны $\mu_x = 0{,}43 \cdot 2\pi$, $\mu_y = 0{,}15 \cdot 2\pi$. Набег фазы по горизонтали определяется условием минимизации эмиттанса. Набег фазы по вертикали для обеспечения малой хроматичности должен быть сравнительно небольшим. Для коррекции хроматичности используются два семейства секступольных линз.

Один из двух «длинных» прямолинейных промежутков (длина 7,2 м) планируется использовать для вигглера и инжекционного киккера, другой — для ВЧ-резонаторов и второго киккера. В одном из «коротких» прямолинейных промежутков (длина 5,52 м) будет размещен ондулятор, в другом — септумный магнит. Для оптимизации синхротронного излучения из вигглера, а также минимизации возмущений, вносимых включенным вигглером, горизонтальная и вертикальная β-функции в центре прямолинейного промежутка для вигглера выбраны малыми: $\beta_x = 1{,}05$ м и $\beta_y = 2{,}8$ м (рис. 4).

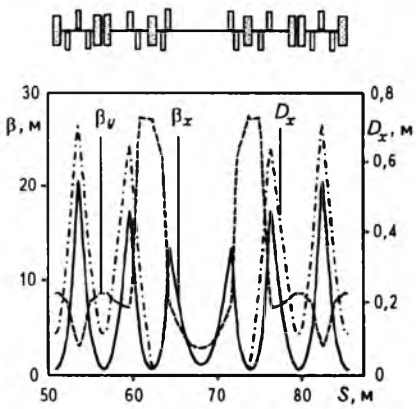


Рис. 4. Структурные функции квадранта кольца с прямолинейным промежутком для вигглера

Для достижения большого времени жизни пучка нужно минимизировать влияние рассеяния на атомах остаточного газа. Для этого вертикальная β-функция в центре прямолинейного промежутка, содержащего ондулятор, должна быть малой. В накопителе ДЭЛСИ β-функции в центре прямолинейного промежутка с ондулятором выбраны равными $\beta_x = 14{,}55$ м и $\beta_y = 0{,}98$ м (рис. 5).

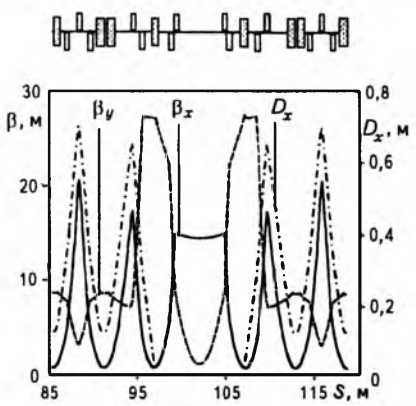


Рис. 5. Структурные функции квадранта кольца с прямолинейным промежутком для ондулятора

«Короткий» прямолинейный промежуток, идентичный ондуляторному, содержит устройства для инжекции. Замкнутая орбита с циркулирующим пучком подводится к септуму с помощью двух киккеров, расположенных в противоположных прямолинейных промежутках и разделенных по фазе бетатронных колебаний на 9π.

Влияние встроенных устройств на линейную оптику, динамическая апертура и коррекция замкнутой орбиты. Для расчета влияния вигглера на оптику накопителя были использованы результаты магнитных измерений поля трехполюсного вигглера с полем 10 Тл в центральной части, разработанного в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Для уменьшения влияния вигглера на магнитную структуру «восстановление» оптики проведено в два этапа. Сначала путем вариации сил в дублете промежутка с вигглером было обеспечено выполнение условия $\alpha_x = \alpha_y = 0$ в центре вигглера. При этом в остальной части кольца β-функции оставались такими же, как и с выключенным вигглером, но частоты бетатронных ко-

лебаний Q_x, Q_y изменились вследствие изменения β-функций в промежутке с вигглером. Затем была проведена коррекция частот бетатронных колебаний с одновременной минимизацией разбиения β-функций по всему ускорителю. При этом варьировались силы всех семейств квадруполей. В результате изменение β-функций для структуры с включенным вигглером составило 7%, эмиттанс электронного пучка возрос от 11,4 до 21,3 нм. Окончательный вид структурных функций квадранта с включенным вигглером представлен на рис. 6. Такая же процедура была применена при расчете влияния ондулятора на оптику накопителя (0,75 Тл, 150 периодов, длина периода 2,25 см). Его влияние оказалось заметно слабее: разбиение β-функций составляет менее 1%, эмиттанс пучка уменьшился до 11,14 нм.

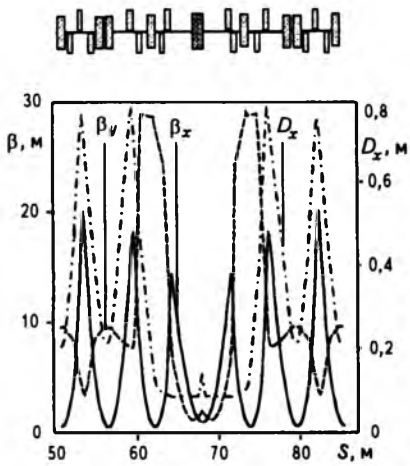


Рис. 6. Структурные функции квадранта кольца с включенным вигглером

Для эффективной инжекции при энергии 0,8 ГэВ необходимо иметь динамическую апертуру по горизонтали больше $31\sigma_x$, поскольку предполагается использовать септум AmPS с толщиной ножа 3 мм. При энергии 1,2 ГэВ динамическая апертура должна быть больше, чем $21\sigma_x$ для частиц с нулевым отклонением импульса. Расчеты с использованием программы MAD [3] показали, что для структуры с выключенным вигглером и ондулятором без учета ошибок и при нулевом отклонении импульса динамическая апертура составляет $99\sigma_x$ и $87\sigma_y$ при энергии 1,2 ГэВ (рис. 7). Для частиц с отклонением по импульсу $\Delta p = +1\%$ расчетная динамическая апертура уменьшается до $71\sigma_x$ и $81\sigma_y$, для частиц с отклонением по импульсу $\Delta p = -1\%$ — до $70\sigma_x$ и $79\sigma_y$ соответственно. При включенном вигглере динамическая апертура снижается до $64\sigma_x$ и $86\sigma_y$, при включенном ондуляторе — до $70\sigma_x$ и $78\sigma_y$. В обоих случаях динамическая апертура достаточна для удовлетворительного времени жизни. Возможный путь увеличения динамической апертуры — установка дополнительных семейств секступолей в промежутках с нулевой дисперсией.

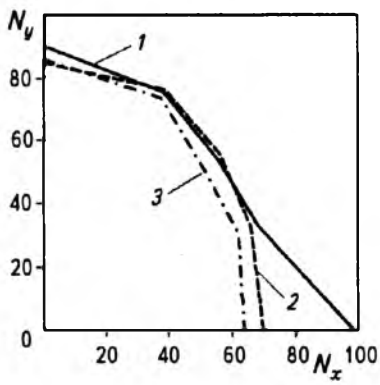


Рис. 7. Динамическая апертура без учета ошибок, выраженная в стандартных отклонениях, для структуры без встроенных устройств (*1*), для структуры с включенным ондулятором (*2*) и вигглером (*3*) соответственно

Основными источниками ошибок замкнутой орбиты для горизонтальной плоскости накопительного кольца ДЭЛСИ являются ошибки поля в дипольных магнитах (нестабильность источников питания) и смещение квадрупольных линз по горизонтали, для вертикальной плоскости — смещение квадрупольных линз по вертикали и поворот дипольных магнитов вокруг продольной оси. Ошибки в элементах структуры задавались случайным образом, среднеквадратичные отклонения таковы: смещение квадрупольных линз 200 мкм, поворот дипольных магнитов вокруг продольной оси 1 мрад, допуск на магнитное поле в дипольных магнитах — $5\cdot10^{-4}$.

Для коррекции замкнутой орбиты были предложены две схемы. В первой схеме использовали 40 корректирующих магнитов для горизонтальной плоскости (три для согласующих ячеек и два для периодических) и 32 корректирующих магнита для вертикальной плоскости (по два в согласующих и периодических ячейках). Для второй схемы коррекции использовали 24 корректирующих магнита для горизонтальной плоскости (два для согласующих ячеек и один для периодических) по 32 корректирующих

магнита для вертикальной плоскости (по два в согласующих и периодических ячейках). В обеих схемах коррекции 48 датчиков положения пучка (по три в согласующих и периодических ячейках).

Орбиту рассчитывали с выключенной и включенной системой коррекции при энергии электронного пучка 1,2 ГэВ. Рассчитано 50 вариантов набора ошибок. Максимальное отклонение орбиты при выключенной системе коррекции составило в одном из вариантов 15 мм для горизонтальной плоскости и 26 мм — для вертикальной. В одном варианте из 50 синхротрон оказался неустойчивым из-за суммового резонанса связи.

При включенной системе коррекции максимальное отклонение орбиты составило для горизонтальной плоскости 1,8 мм в первой схеме коррекции (40 корректирующих магнитов) и 3 мм во второй (24 корректирующих магнита), для вертикальной плоскости — 0,99 мм. Максимальная сила корректоров 0,84 мрад в первой схеме коррекции и 0,74 мрад во второй, что соответствует силе корректирующих магнитов. Эмиттанс пучка меняется незначительно.

Динамическая апертура при включенной системе коррекции была рассчитана для двух наборов ошибок. В первом из них возникает максимальное по всем 50 вариантам отклонение орбиты, во втором — типовое (среднее по вариантам) отклонение орбиты. Динамическая апертура для этих двух наборов составила $67\sigma_x$, $91\sigma_y$ и $70\sigma_x$, $88\sigma_y$ соответственно для первой схемы коррекции (40 корректоров для горизонтальной плоскости и 32 для вертикальной) и $58\sigma_x$, $100\sigma_y$ и $64\sigma_x$, $95\sigma_y$ для второй схемы коррекции (24 корректора для горизонтальной плоскости и 32 для вертикальной). Таким образом, минимальная динамическая апертура в месте расположения септумного магнита составляет 24 мм, что достаточно для организации эффективной инжекции. При включенном вигглере динамическая апертура составила $62\sigma_x$, $87\sigma_y$ для структуры с набором ошибок, дающим максимальное по 50 вариантам отклонение орбиты (рис. 8).

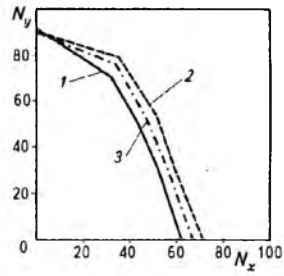


Рис. 8. Динамическая апертура с учетом ошибок, выраженная в стандартных отклонениях (40 корректоров для горизонтальной плоскости, 32 для вертикальной), для структуры с максимальным отклонением орбиты и включенным вигглером (*1*), со средним (*2*) и максимальным отклонением орбиты (*3*) соответственно

Перспективы развития комплекса ДЭЛСИ. Преимуществом выбранной магнитной структуры является возможность дальнейшей модернизации накопительного кольца с целью увеличить энергию и жесткость синхротронного излучения. Для этого предполагается в каждом квадранте восемь регулярных поворотных магнитов заменить на специальные, которые выполнены по технологии, разработанной в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. Эти магниты имеют концентраторы поля на постоянных магнитах, что позволяет увеличить магнитное поле в зазоре до 3—4 Тл без использования сверхпроводимости. Внедрение таких магнитов повысит энергию ускорителя до 1,8 ГэВ и сдвинет максимум спектра синхротронного излучения из поворотных магнитов в область энергии фотонов ~6 кэВ.

Другой возможностью развития комплекса является создание семейства лазеров на свободных электронах. Линейный ускоритель ДЭЛСИ способен ускорять электроны до энергии 800 МэВ при средней мощности пучка в десятки киловатт, что делает возможным создание уникального комплекса лазеров на свободных электронах, перекрывающего диапазон волны от дальнего инфракрасного до низкоэнергетического рентгеновского. Излучение с длиной волны 0,2—100 мкм будут генерировать лазеры на свободных электронах, расположенные непосредственно в туннеле ускорителя. Указанный диапазон может быть перекрыт тремя ЛСЭ-генераторами, пиковая мощность выходного излучения которых будет равна нескольким мегаваттам при средней мощности в несколько ватт [4]. Технические характеристики оборудования близки к характеристикам комплекса лазеров на свободных электронах, построенного в исследо-

вательском центре FELI (Осака, Япония) [5]. Важно отметить, что использование имеющихся помещений здания линейного ускорителя позволит максимально быстро ввести в строй лаборатории пользователей излучения.

Генерация коротковолнового когерентного излучения будет возможна при однократном прохождении электронного пучка линейного ускорителя ДЭЛСИ через длинный ондулятор. Отсутствие зеркал позволит получать излучение любой длины волны до рентгеновского [6]. Такая схема получила название SASE FEL (Self Amplified Spontaneous Tmission Free Tlectron Laser). Близкая по параметрам установка строится в настоящее время в DESY (Гамбург, ФРГ) [7, 8]. Оценки показывают, что при энергии электронного пучка 1 ГэВ минимальная длина волны в комплексе ДЭЛСИ составит около 5 нм. Перестройка энергии линейного ускорителя даст возможность плавно перекрыть диапазон длины волны от 5 до 200 нм. Пиковая мощность излучения составит 2—3 ГВт при средней мощности в несколько ватт. По сравнению с источником синхротронного излучения третьего поколения пиковая яркость излучения возрастет в 10^7 раз. В дальнейшем энергия линейного ускорителя ДЭЛСИ может быть увеличена до 2 ГэВ при соответствующей модификации системы СВЧ-питания. В результате минимальная длина волны может быть доведена до 1 нм [4].

Оценки показывают, что оборудование ДЭЛСИ может быть модифицировано в целях расширения его возможностей как источника синхротронного излучения четвертого поколения в диапазоне длины волны от дальнего инфракрасного до 1—5 нм. В основном модификация будет связана с установкой ондуляторов и сильноточных инжекторов линейного ускорителя. Для комплекса ЛСЭ-генераторов требования к параметрам пучка сравнительно мягкие: пиковый ток в сгустке должен составлять несколько десятков ампер при нормализованном эмиттансе 20—30 мм·рад. Такой инжектор может быть реализован либо с применением техники субгармонических СВЧ-группирователей, либо с установкой СВЧ-пушки с фотокатодом. Для генерации короткой длины волны в однопроходном ЛСЭ-усилителе требуется больший пиковый ток, что достигается дополнительной установкой дисперсионных секций (банч-компрессоров) в ускорительном тракте.

Необходимо отметить, что упомянутые приемы увеличения пикового тока успешно реализованы на практике.

Заключение. На основе элементов ускорительного комплекса NIKHEF представляется возможным создать в ОИЯИ источник синхротронного излучения третьего поколения ДЭЛСИ как источник синхротронного излучения высокой яркости в широком спектральном диапазоне — от далекого инфракрасного (100 мкм) до высокоэнергетического рентгеновского (50 кэВ). Это существенно расширит программу научных исследований института.

Магнитная структура, разработанная для накопителя ДЭЛСИ на основе элементов AmPS, даст возможность установить вигглер магнитным полем 10 Тл и ондулятор. Динамическая апертура достаточна для эффективной инжекции и достижения необходимого времени жизни. Система коррекции замкнутой орбиты позволяет использовать имеющиеся дипольные корректоры.

Реализация программы создания лазеров на свободных электронах позволит создать универсальный лазерный центр, не имеющий аналогов в мире по диапазону плавной перестройки длины волны излучения, от далекого инфракрасного до низкоэнергетического рентгеновского. Использование излучения ЛСЭ, синхронизованного с импульсами синхротронного излучения из накопителя ДЭЛСИ, значительно расширит исследования синхротронного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Titkova I.V., Arkhipov V.A., Antropov V.K. Project of the Dubna Electron Synchrotron. — In: Proc. of EPAC'2000, 25—30 June, 2000, Vienna, Austria, p. 702—705.

2. Titkova I.V., Beloshitsky P.F., Meshkov I.N. Magnet lattice of the synchrotron radiation source DELSY. — Ibid., p. 708—710.
3. The MAD Program, Version 8.19, CERN/SL/90-13(AP) Rev. 5.
4. Meshkov I.N., Syresin E.M., Yurkov M.V. Perspective of DELSY for the fourth generation SR facility. — In: Proc. of EPAC'2000, 25—30 June, 2000, Vienna, Austria, p. 660—662.
5. Tomimasu T., Saeki K., Miyauchi Y. The FELI FEL facilities — challenges at simultaneous FEL beam sharing systems and UV-range FELs. — Nucl. Instrum. Methods, A, 1996, v. 375, p. 626—631.
6. Derbenev Ya.S., Kondratenko A.M., Saldin E.L. On the possibility of using a free electron laser for polarization of electrons in storage rings. — Ibid, 1982, v. 193, p. 415—421.
7. A VUV Free Electron Laser at the TESLA Test Facility: Conceptual Design Report, DESY Print TESLA-FEL 95-03, Hamburg, DESY, 1995.
8. Rossbach J. A VUV Free electron laser at the TESLA test facility at DESY. — Nucl. Instrum. Methods, A, 1996, v. 375, p. 269—273.

Поступила в Редакцию 4.05.01

УДК 615.849

НЕЙТРОНОЗАХВАТНАЯ ТЕРАПИЯ ТЕПЛОВЫМИ НЕЙТРОНАМИ НА ИРТ МИФИ

Зайцев К.Н., Портнов А.А., Савкин В.А. (МИФИ), Кулаков В.Н., Хохлов В.Ф., Шейно И.Н. (ГНЦ РФ — Институт биофизики), Вайнсон А.А., Козловская Н.Г., Мещерикова В.В., Митин В.Н., Ярмоненко С.П. (Онкологический научный центр РАМН)

Нейтронозахватная терапия является методом, способным повысить эффективность радиотерапии, — она избирательно поражает опухоль при сохранении клеток нормальной ткани. Сущность метода проста: в опухоль вводят препарат, содержащий бор, гадолиний или другие элементы, обладающие большим сечением захвата тепловых нейтронов. В результате захвата тепловых нейтронов в опухоли возникает вторичное излучение, которое и поражает опухолевые клетки. Поэтому этот метод интенсивно развивается.

Первые эксперименты по нейтронозахватной терапии на белых крысах с перевиваемыми опухолями (саркома Енсена и С-45) на ИРТ МИФИ с использованием гадолинийсодержащего препарата магневист фирмы «Шеринг» (Германия) были проведены в 1993 г. [1]. Этот препарат, применяемый в качестве контрастного в ЯМР-диагностике опухолей мозга, способен накапливаться в тканях опухоли. Его вводили непосредственно в опухоль, концентрацию и время облучения подбирали таким образом, что в результате у 80% крыс наблюдали полную резорбцию опухоли (рис. 1, 2). Первые эксперименты проводили при низкой плотности потока тепловых нейтронов ($\sim 10^8$ $с^{-1} \cdot см^{-2}$) и на фоне мощного сопутствующего фотонного излучения пучка (1,2 сГр/с), которое является паразитным.

Основная цель настоящей работы — проведение комплексных предклинических исследований нейтронозахватной терапии. При этом выбрано направление исследований, которое даст возможность лечить злокачественную меланому, так как пучок тепловых нейтронов эффективно обрабатывает опухоли, локализованные вблизи поверхности тела (уже на глубине ~2 см он уменьшается в 2 раза).

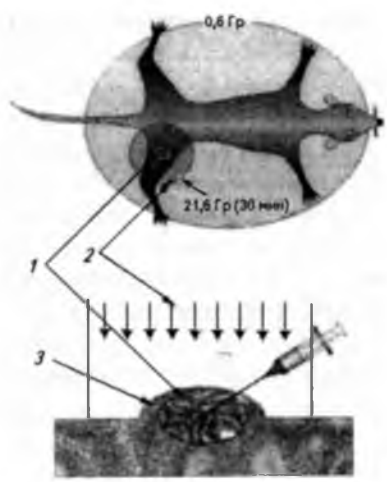


Рис. 1. Схема эксперимента нейтронозахватной терапии опухолей крыс: *1* — опухоль; *2* — пучок тепловых нейтронов; *3* — кожа