

## СИСТЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОМПРЕССИИ

*А.Н. Довбня, С.Г. Кононенко, Г.Д. Пугачев, В.А. Шендрик, В.С. Шестакова*  
 Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
 Харьков, Украина  
 E-mail: ksg@kipt.kharkov.ua

На основе программ TRANSPORT, MADX выбран вариант системы энергетической компрессии (СЭК) ускорителя электронов с энергией до 130 МэВ и мощностью пучка до 100 кВт. СЭК состоит из четырех дипольных магнитов ускоряющей секции, трех квадрупольных линз и двух коллиматоров. Выбранная СЭК позволяет уменьшить энергетический разброс до  $\sim 1.5\%$ . Общие потери пучка в дипольных магнитах и коллиматорах составляют 8.67%. Для выбора материала коллиматоров проведены расчеты мощности эквивалентной дозы в зависимости от времени после выключения ускорителя.

В ННЦ ХФТИ рассматривается возможность создания подкритической сборки, управляемой импульсным электронным ускорителем на энергию 85...130 МэВ, мощностью до 100 кВт в пучке, частота повторения импульсов 100...150 Гц, длительность импульса 3...16 мкс [1-3].

Расчетный энергетический разброс в пучке и зависимость отклонения энергии от фазы для пучка с энергией 130 МэВ и мощностью 100 кВт показаны на Рис.1,2.

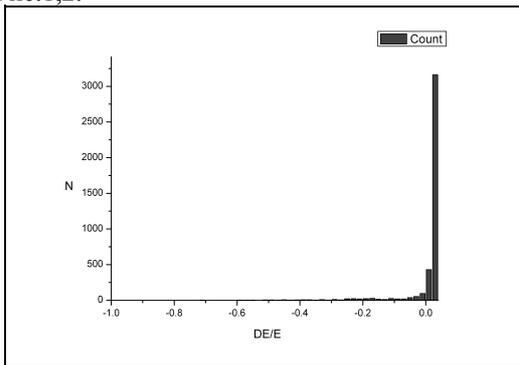


Рис.1. Энергетический разброс на выходе ускорителя

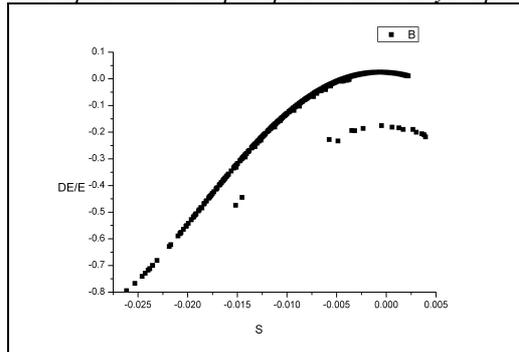


Рис.2. Зависимость относительного отклонения энергии электронов от фазы на выходе ускорителя

Как видно Рис.1 из-за наличия низкоэнергетического "хвоста" необходимо уменьшение энергетического разброса в пучке. Аналитический расчет системы энергетической компрессии (СЭК) затруднителен из-за нестандартного распределения частиц в сильноточном пучке. В связи с этим выбор системы СЭК проводился с помощью программы MAD-X[4] (расчет прохождения пучка в компенсирующей секции осуществляется в приближении нулевого тока).

Начальное распределение пучка состояло из 3393 частиц, которые пропускались через СЭК и на выходе регистрировались потери частиц и энергия прошедших частиц. На Рис.3 показана схема системы энергетической компрессии СЭК, где: М1-М4 – дипольный магниты; q1-3 – квадрупольные линзы; АС – ускоряющая секция; К1, К2 – коллиматоры пучка; 1 – Траектория частицы с энергией 130 МэВ (угол поворота в магнитах  $10^\circ$ ); 2 – Траектория частицы с энергией 130 МэВ (угол поворота в магнитах  $15^\circ$ ).

Расчет также проводился для угла поворота в магнитах  $22,5^\circ$ .

Основные требования к СЭК: минимальные потери пучка (при приемлемом энергетическом разбросе на выходе СЭК, локализация потерь пучка на коллиматорах К1, К2).

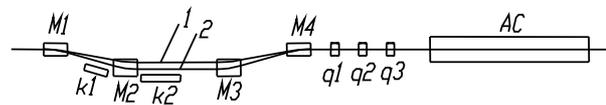


Рис.3. Схема системы энергетической компрессии СЭК

На Рис.4-6 показаны зависимости ширины спектра от потерь пучка при углах поворота  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  и  $22,5^\circ$  в магнитах М1-М4 системы СЭК от потерь пучка (основные потери (90...95%) происходят на коллиматоре К2). А – полная ширина спектра; В – ширина спектра в которой содержится 95% частиц.

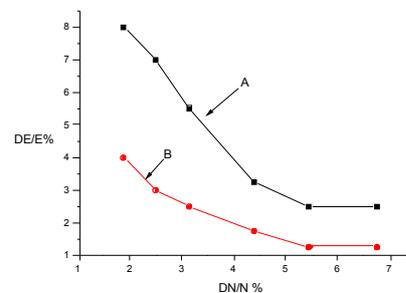


Рис.4. Зависимость ширины спектра от потерь пучка при угле поворота  $10^\circ$  в магнитах

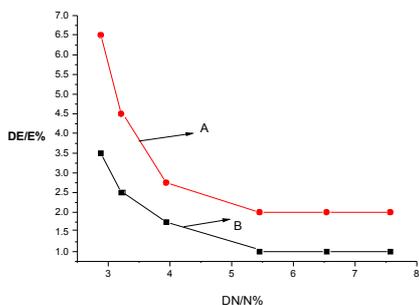


Рис.5. Зависимость ширины спектра от потерь пучка при угле поворота 15° в магнитах

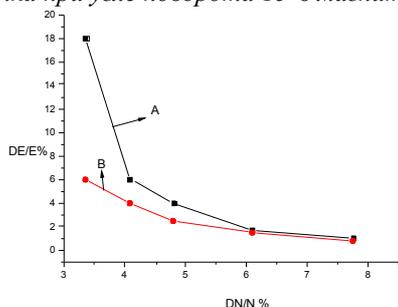


Рис.6. Зависимость ширины спектра от потерь пучка при угле поворота 22.5° в магнитах

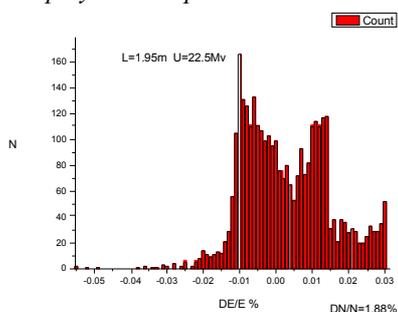


Рис.7. Спектр пучка при угле поворота в магнитах 10° (потери пучка 1.88%)

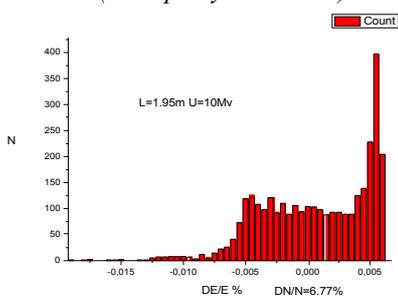


Рис.8. Спектр пучка при угле поворота в магнитах 10° (потери пучка 6,77%)

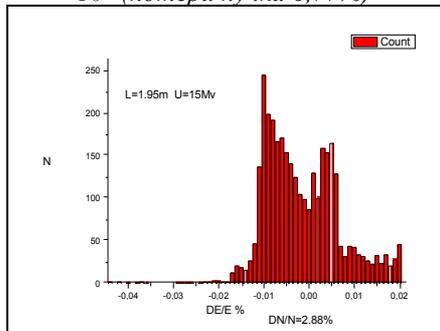


Рис.9. Спектр пучка при угле поворота в магнитах 15° (потери пучка 2,88%)

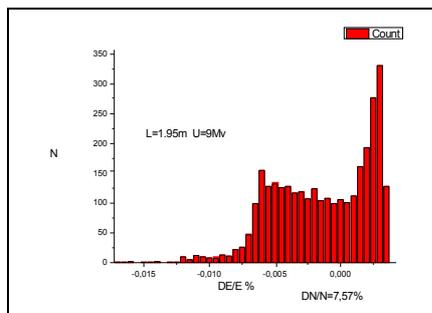


Рис.10. Спектр пучка при угле поворота в магнитах 15° (потери пучка 7,57%)

На основе проведенных расчетов была выбрана система СЭК с углами поворота в магнитах от 10° до 15°, которая позволяет регулировать потери пучка в пределах 1.88...7.5%, спектр 4...1% (95% частиц). СЭК с углом поворота 22,5° дает меньший диапазон потерь: 4...7,5%, спектр 4...1% (95% частиц). В Табл.1 приведены параметры системы СЭК

Таблица 1. Параметры системы СЭК

Средняя энергия пучка, МэВ		130
1	Поле в магнитах (кГс), при углах поворота 10° и 15°	2.59; 3,89
2	Длина дипольных магнитов, м	0.3
3	Горизонтальная апертура дипольных магнитов М1, М2, см	15
4	Горизонтальная апертура дипольных магнитов М3, М4, см	19
5	Вертикальная апертура дипольных магнитов, см	2
6	Длина прямолинейных промежутков между М1, М2 и М3, М4, м	0,6
7	Длина прямолинейного промежутка между М2 и М3, м	1
8	Длина К1, м	0,3
9	Расстояние от орбиты до К1, см	8...8.5
10	Длина К2, м	0,5
11	Расстояние от орбиты до К2, см	0.6...4.8
12	Количество квадрупольных линз	3
13	Максимальный градиент поля в квадрупольных линзах q1-q3, Т/м	1,6
14	Длина квадрупольных линз, м	0.1
15	Апертура квадрупольных линз, см	2
16	Максимальное значение дисперсионной функции (при угле поворота 10°, 15°), м	0,157; 0,2275
17	Продольная дисперсия при углах поворота 10° и 15°, град./процент	1,7; 3,4
18	Длина ускоряющей секции, м	2
19	Максимальная амплитуда ускоряющего поля, МВ	15

Для выбора материалов поглощающих участков коллиматоров были проведены расчеты радиационной обстановки, создаваемой подходящими для конструкционных материалов облученными химическими элементами. Сравнительные характеристики некоторых параметров при взаимодействии электронного пучка мощностью 10 кВт и энергией 100 МэВ с различными материалами приведены в Табл.2.

Зависимость экспозиционной дозы (в мкР/с), создаваемой различными химическими элементами коллиматора, от времени, после выключения пучка на поверхности и на расстоянии 0,5 м от коллиматора, приведена в Табл.3.

**Таблица 2. Сравнительные характеристики конструкционных материалов**

Ядро	Пробег электронов	dE <sub>ион</sub> (кВт)	mKu	ΔT° C/c S=1 см <sup>2</sup>
C	16,3	6,937	0,81·10 <sup>5</sup>	178
Al	11,85	5,57	5,15·10 <sup>2</sup>	211
<sup>64</sup> Cu	2,79	1,237	0,92·10 <sup>5</sup>	431
<sup>62</sup> Cu	2,79	2,754	2,05·10 <sup>5</sup>	431
H <sub>2</sub> O	32,5	6,749	3,5·10 <sup>4</sup>	50,4

**Таблица 3. Экспозиционные дозы (мкР/с)**

Время (час)		0	1	3	5	10	120
<sup>12</sup> C	поверхность	1,35·10 <sup>5</sup>	1,76·10 <sup>4</sup>	2,98·10 <sup>2</sup>	5,06	1,9·10 <sup>-4</sup>	
	0,5м	4,0·10 <sup>3</sup>	5,2·10 <sup>2</sup>	8,84	0,15	5,6·10 <sup>-6</sup>	
<sup>24</sup> Na	поверхность	6,03·10 <sup>2</sup>	5,72·10 <sup>2</sup>	5,25·10 <sup>2</sup>	4,79·10 <sup>2</sup>	3,8·10 <sup>2</sup>	2,36
	0,5м	9,55	9,12	8,31	7,58	6,02	3,79·10 <sup>-2</sup>
<sup>64</sup> Cu	поверхность	2,7·10 <sup>4</sup>	2,56·10 <sup>4</sup>	2,3·10 <sup>4</sup>	2,06·10 <sup>4</sup>	1,57·10 <sup>4</sup>	40,7
	0,5м	1,05·10 <sup>3</sup>	0,99·10 <sup>3</sup>	0,89·10 <sup>-3</sup>	0,8·10 <sup>3</sup>	0,61·10 <sup>3</sup>	1,58
<sup>64</sup> Cu	поверхность	1,0·10 <sup>5</sup>	1,42·10 <sup>3</sup>	2,9·10 <sup>-3</sup>			
	0,5м	3,8·10 <sup>3</sup>	54,6	1,1·10 <sup>-5</sup>			
<sup>15</sup> O	поверхность	4,8·10 <sup>4</sup>	4,8·10 <sup>-5</sup>				
	0,5м	1,4·10 <sup>3</sup>					

Из Табл.1 и 2 видно, что наиболее подходящим материалом для поглощающих участков коллиматора можно считать графит или алюминий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. F. Carminati, R. Klapisch, J.P. Revol, Ch. Roche, J.A. Rubio, C. Rubbia. An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator // Geneva: 1993. 72 с. (CERN/AT/93-47 (ET)).
2. Матеріали українсько-американського семінару "Установка з підкритичною збіркою, керована прискорювачем часток". Ukraine-USA Meeting

"Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility". Україна, Харків, 24-25 лютого 2005 / Під ред. Довбні А. М. ННЦ ХФТІ, Харків, 2005, с.246.

3. M. Ayzatskiy, A. Dovbnya, V. Mytrochenko. Physical study of power electron linac for neutron source // Proc. of Ukraine-USA Meeting "Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility". Kharkiv, Feb. 24-25, 2005, p.47-66.
4. W. Herr and F. Schmidt M. "A MAD<sub>-</sub>X Primer", CERN-AB-2004-027-ABP

Статья поступила в редакцию 28.11.2007 г.

### ENERGY COMPRESSION SYSTEM

*A.N. Dovbnja, S.G. Kononenko, G.D. Pugachev, V.A. Shendrik, V.S. Shestakova*

On the basis of programs TRANSPORT, MADX the variant of energy compression system (ECS) of electron accelerator with energy about 130 MeV and the beam power up to 100 kw is chosen. ECS includes four dipole magnets, the accelerating section, three quadrupole lenses and two collimators. The chosen ECS allows to reduce an energy spread up to ~1,5%. The total beam losses in dipole magnets and collimators make 8,67%. For the choice of collimator material the calculations of the equivalent dose power, in dependence of time after accelerator switch out, have been carried out.

### СИСТЕМА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ КОМПРЕСІЇ

*A.M. Довбня, С.Г. Кононенко, Г.Д. Пугачов, В.А. Шендрік, В.С. Шестакова*

На основі програм TRANSPORT, MADX вибрано варіант системи енергетичної компресії (СЕК) прискорювача електронів з енергією до 130 МеВ та потужністю пучка до 100 кВт. СЕК складається з чотирьох дипольних магнітів прискорюючої секції, трьох квадрупольних лінз та двох коліimatorів. Вибрана СЕК дозволяє зменшити енергетичний розкид до ~1,5%. Загальні втрати пучка в дипольних магнітах та коліimatorах складають 8,67%. Для вибору матеріалу коліimatorів проведені розрахунки потужності еквівалентної дози в залежності від часу після вимикання прискорювача.