

## СИСТЕМА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ «ЭПОС»

*В.Н. Борискин, И.С. Гук, А.Н. Довбня, Р.Н. Дронов, Г.Г. Ковалёв, С.Г. Кононенко,  
Л.К. Мякушко, А.Ю. Мыцьков, В.А. Попенко, Л.В. Репринцев, В.П. Ромасько,  
А.С. Тарасенко, В.И. Татанов, В.А. Шендрик, В.Н. Щербинин*  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина*  
*E-mail: guk@kipt.kharkov.ua*

Линейный двухсекционный ускоритель «ЭПОС» в настоящее время используется для радиационной обработки в диапазоне энергий до 35 МэВ со средней мощностью в пучке до 12 кВт. Ряд радиационных технологий требует исключить попадание электронов с энергией ниже 17 МэВ на мишени. Для выполнения этого условия на ускорителе разработана, изготовлена и введена в эксплуатацию система энергетического фильтра, состоящая из постоянного дипольного магнита и магнита с переменным магнитным полем, предназначенным для развертки пучка на мишени. Система включает в себя также два охлаждаемых коллиматора и датчики, предназначенные для измерения параметров и положения пучка.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Линейный ускоритель «ЭПОС» является самым мощным из пяти электронных ускорителей ННЦ ХФТИ, активно используемых в радиационных технологиях [1]. Ускоряющая система «ЭПОС» состоит из двух секций. Входная часть первой секции используется также для инжекции низкоэнергетичного пучка из электронной пушки в ускоритель. Два клистрона с мощностью около 12 МВт в импульсе используются как источники высокочастотного питания этих секций. Источниками питания клистронных усилителей являются импульсные модуляторы с коммутаторами на основе тиратронов. ННЦ ХФТИ с начала 90-х годов предыдущего столетия перестал получать новые клистроны и тиратроны, поскольку промышленность прекратила их изготовление. На ускорителях сейчас используются отреставрированные старые клистроны, а также клистроны, которые в свое время были забракованы по некоторым параметрам для работы на ускорителе ЛУ 2000, и гарантийный срок эксплуатации которых истёк. Тиратроны, используемые на ускорителях, сняты в своё время с установок, на которых они уже отработали по 500 часов и которые больше не могут быть по техническим требованиям использованы на этих установках. Но именно от качества и стабильности параметров этих главных систем ускорителя в первую очередь зависят стабильность и спектр электронного пучка. Особенно сильно изменяется спектр электронов при пропуске запуска модуляторов. Это явление приводит к существенному снижению энергии частиц, что в некоторых случаях недопустимо для задач, выполняемых в настоящее время на ускорителе. В связи с этим возникает задача недопущения попадания на мишень частиц с энергиями, ниже некоторой установленной величины.

### 2. РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ СИСТЕМ ФИЛЬТРА

Одним из возможных вариантов решения этой проблемы является создание на выходе ускорителя энергетического фильтра, который, вне зависимости от параметров электронного пучка, не пропускал бы на мишень частицы с нежелательными энергиями.

Общий вид выходных устройств ускорителя до реконструкции представлен на Рис. 1.

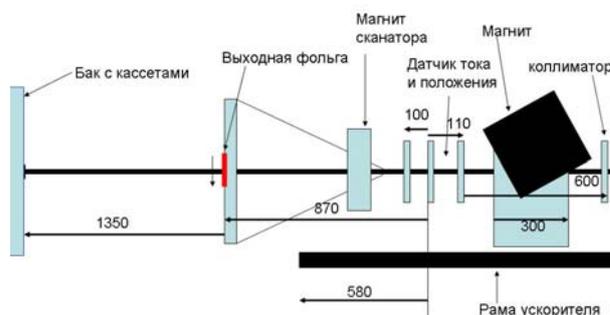


Рис. 1. Выходные устройства ускорителя

Пучок после второй секции проходил через охлаждаемый коллиматор диаметром 27 мм и с помощью корректоров, расположенных на второй секции, датчика тока и положения выводился по центру импульсного магнита сканатора [2], предназначенного для развертывания пучка на входном окне бака с кассетами с облучаемыми материалами. Для вывода пучка в атмосферу используется фольга толщиной 50 микрон из титана, охлаждаемая потоком воздуха. Электромагнит, располагавшийся между коллиматором и датчиком, эпизодически использовался для измерения энергии пучка. Поскольку положение камеры сканатора с выходной фольгой и бака с кассетами по техническим причинам изменять было нельзя, мы предложили схему фильтра, представленную на Рис. 2. Система энергетического фильтра проектировалась для поглощения электронов с энергией меньше 17 МэВ, однако разработанный для этой системы дипольный магнит позволяет варьировать эту энергию в широких пределах.

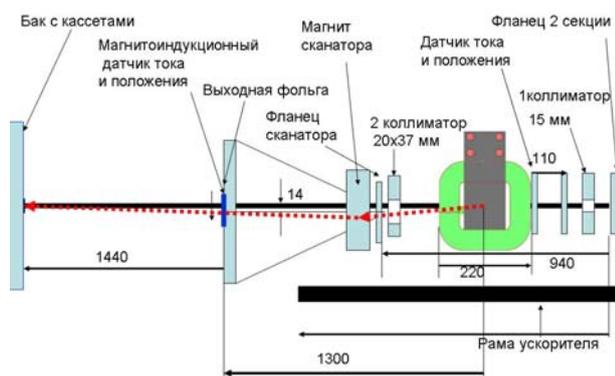


Рис.2. Выходные устройства ускорителя после реконструкции

В состав системы входят:

1. Охлаждаемый водой коллиматор с отверстием диаметром 15 мм, предназначенный для поглощения «шубы» низкоэнергетичных электронов вокруг основного пучка электронов (см. Рис.2 и Рис.3). Прототипом коллиматоров, используемых в данной системе, послужила конструкция базового коллиматора, разработанного для технологического ускорителя ЛУ-10 [6].

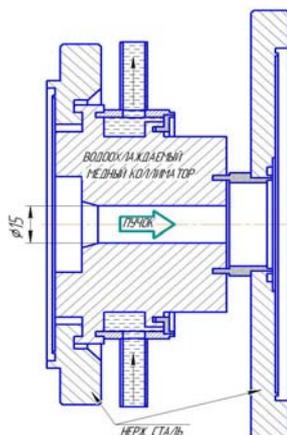


Рис.3. Входной коллиматор системы

2. Индукционный датчик тока и положения пучка [5], необходимый для выведения пучка в центр отклоняющего магнита (Рис.4,5).

Датчик позволяет определять положение центра тяжести пучка электронов в двух плоскостях с точностью  $\pm 0,25$  мм, форму и величину импульса тока пучка с точностью  $\pm 2$  %.

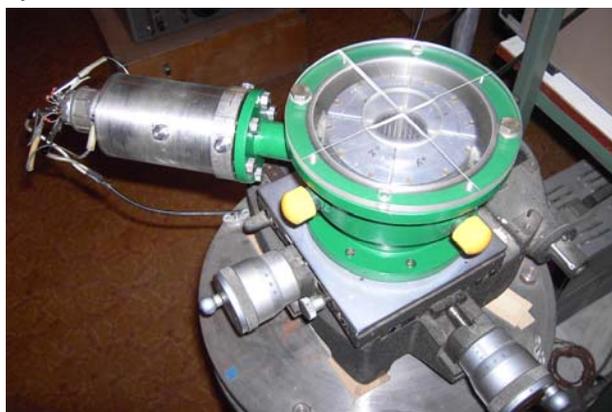


Рис.4. Датчик тока и положения пучка на калибровочном стенде

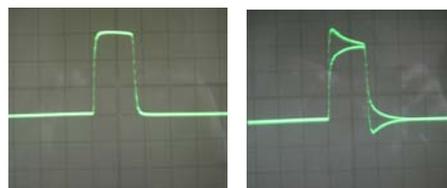


Рис.5. Совмещенные осциллограммы сигналов с противоположных обмоток датчика положения пучка при нулевом смещении имитатора пучка (а) и смещении на 5,0 мм (б); ток в импульсе 0,65 А и длительность импульса 3,5 мкс

3. Дипольный электромагнит (Рис.6). Магнитопровод магнита изготовлен из железа АРМКО, полюса имеют прямоугольную форму с размерами  $100 \times 100$  мм. Магнитный зазор магнита равен 25 мм, максимальное поле в магните – 0,2 Тл. Обмотка катушек выполнена из медного провода с радиационно- и термостойкой изоляцией. Охлаждение обмотки магнита воздушное, при максимальном токе в обмотке её установившаяся температура не превышает температуру окружающей среды более чем на 15 градусов.

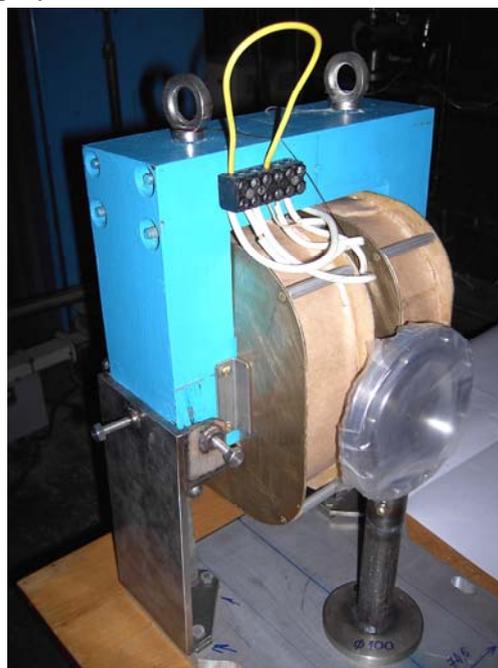


Рис.6. Дипольный магнит на стенде с вакуумной камерой

Используемый для питания магнита источник тока обеспечивает долговременную стабильность поля в магните лучше 0,05 % [3]. Величина тока может задаваться как вручную, так и с помощью управляющей ЭВМ. Источники питания дипольного магнита и магнита сканатора включены в систему УБС ускорителя; при отсутствии напряжения на их выходе пучок отключается.

Точные измерения топографии магнитного поля позволили вычислить эффективную длину магнита в рабочем режиме, равную 133,44 мм, с точностью, лучшей 0,1 %, что позволяет использовать магнит для определения энергетических характеристик пучка. Топография поля магнита вблизи выбранной рабочей точки представлена на Рис.7.

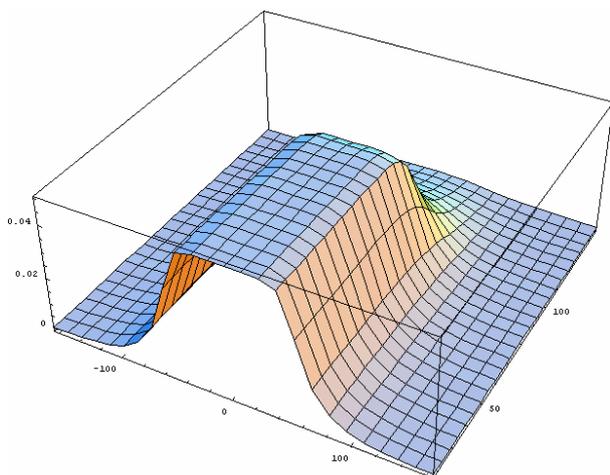


Рис.7. Распределение поля в магните

Пучок отклоняется магнитом вниз, его сила выбирается такой, чтобы частицы с энергией менее 17 МэВ поглощались нижним краем второго коллиматора, имеющего вертикальную щель размерами 20×37 мм (см. Рис.2 и 8).



Рис.8. Второй коллиматор системы

4. Второй охлаждаемый коллиматор устанавливается вплотную к входному фланцу вакуумной камеры сканатора, внутренний диаметр которого равен 40 мм. Коллиматор способен поглощать пучок ускорителя полной мощности (12 кВт) на время, необходимое для отключения пучка (около минуты), и полностью постоянно поглощать «хвост» с энергией ниже 17 МэВ (при нормальной работе модулятора второй секции).

5. В системе используется разработанный ранее [2] магнит сканатора, который разворачивает пучок электронов в вертикальной плоскости. Пучок будет попадать в сканатор под углом к оси ускорителя и смещённым относительно горизонтальной плоскости. Поэтому для равномерного облучения каскет магнит сканатора должен скомпенсировать этот угол путём программного изменения размаха сканирования вверх и вниз. С этой целью источник питания сканирующего магнита [4] был модернизирован. Амплитуда двуполярного тока в нагрузке с активным сопротивлением порядка 0,1 Ом была повышена до 50 А. При этом предусмотрена возможность смещения нулевой линии развертки в пределах ±10 А для рабочего тока 30 А. Для обеспечения линейности развертки пучка электронов источник выполнен по схеме генератора тока. Частота сканирования может меняться, максимальное значение –

6 Гц. Размер пучка по вертикали на баке должен составлять не менее 440 мм.

Для обеспечения возможности использования системы без поворотного магнита, ось сканатора смещена вниз на 14 мм, что позволяет прямому пучку без потерь попадать в сканатор и работать без включения дипольного магнита.

Постоянный дипольный сканирующий магнит обладает хорошей ахроматичностью: моделирование движения пучка в предложенной геометрии показало, что после компенсации угла поворота пучка в магните сканатора смещение пучка по центру каскет не превышает 2 мм при изменении энергии пучка электронов от 20 до 35 МэВ (Рис.9).

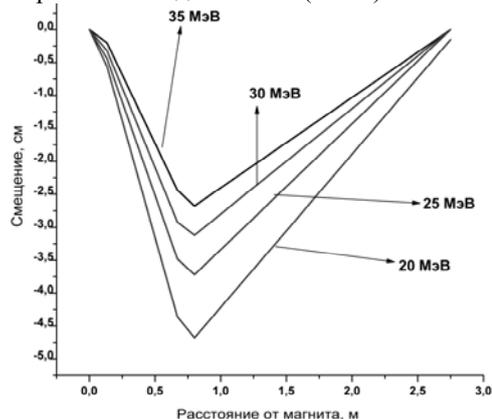


Рис.9. Отклонение пучка на выходе ускорителя

Вакуумная система выходных устройств выполнена из нержавеющей стали, поглотители коллиматора – из меди. Поскольку электронный пучок ускорителя имеет большую мощность, геометрия выходных устройств выбиралась таким образом, чтобы исключить попадание пучка на неохлаждаемые поверхности.

После измерения параметров магнита и калибровки датчика тока и положения пучка на стенде система была смонтирована в бункере ускорителя. Перед запуском все элементы системы и ускорителя были дополнительно отъюстированы по отношению к геометрической оси ускорителя. Общий вид системы после монтажа и запуска показан на Рис.10.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЯ НА ПУЧКЕ

После запуска система отработала три сеанса облучения образцов продукции общей длительностью около 1300 часов.

Кроме того, с использованием дипольного магнита были проведены исследования формы пучка на выходе из вакуума в атмосферу и проведена оценка энергии и энергетического разброса пучка в некоторых режимах работы ускорителя.

На Рис.11 и 12 представлены типичные результаты исследования формы, энергии и энергетического разброса пучка в зависимости от тока пучка в импульсе при частоте токовых посылок около 4 Гц. Исследования проводились с использованием стёкол, величина потемнения которых пропорциональна плотности потока электронов в исследуемых условиях.



Рис.10. Система энергетического фильтра в бункере ускорителя «ЭПОС»

На Рис.11 представлены отпечатки пучка, полученные за выходной фольгой при последовательном увеличении тока в магните от 0 (правое пятно) до 550 мА (левое пятно).

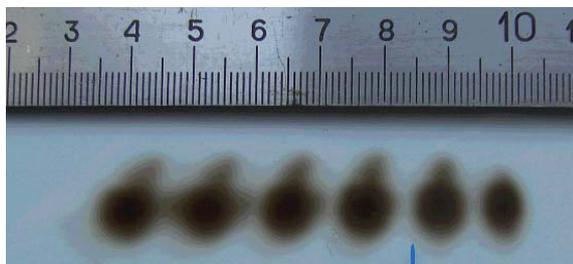


Рис.11. Выбор режима работы фильтра

Величина импульсного тока пучка электронов (240 мА) и настройки ускорителя при этих измерениях не изменялись. Пятый отпечаток соответствует положению пучка при токе 440 мА, поле в магните при этом равно 0,0311 Тл. В этом режиме более 95 % частиц с энергией 17 МэВ поглощаются вторым коллиматором, а частицы с меньшей энергией поглощаются полностью. Этот режим дипольного магнита и был выбран основным для работы фильтра. Энергия частиц, которые дали максимальную плотность потемнения на стекле в этом режиме (было проведено ступенчатое фотометрирование плотности), по данным моделирования движения электронов в реальном поле с помощью программы MAD-X оценивается в 32 МэВ.

На Рис.12 представлены распределения плотности электронного пучка, полученные на стекле при различных значениях тока пучка. Изменения тока были получены в результате перестройки системы транспортировки пучка: изменялись токи соленоидов, сила квадрупольных линз и другие настройки.

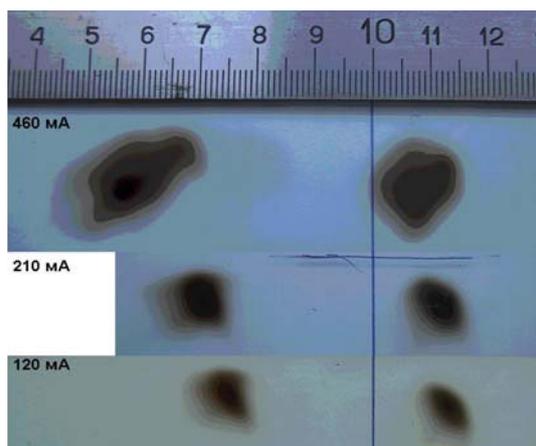


Рис.12. Распределение плотности электронов при разных импульсных токах пучка

Правые отпечатки получены при нулевом токе в магните, левые – при токе в катушках магнита, равном 440 мА.

Как следует из анализа полученных результатов, форма и размеры пучка существенно зависят от тока и настроек ускорителя. В первую очередь это связано с тем, что обе ускоряющие секции ускорителя помещены в соленоиды с полем около 0,05 Тл, величина этого поля варьируется для получения на выходе ускорителя максимального тока. Кроме этого, для настройки ускорителя применяются четыре сильных корректора, размещённые на секциях, и квадрупольные линзы, расположенные между секциями, что существенно влияет на формирование пучка на выходе ускорителя.

Энергетический разброс частиц в пучке при большом токе (см. Рис.12) не превышает 6 МэВ (при уровне плотности электронов 20 % от значения в максимуме).

Полученная зависимость энергии максимума плотности электронного пучка от значения импульсного тока, полученного из серии измерений в указанных выше условиях, представлена на Рис.13.

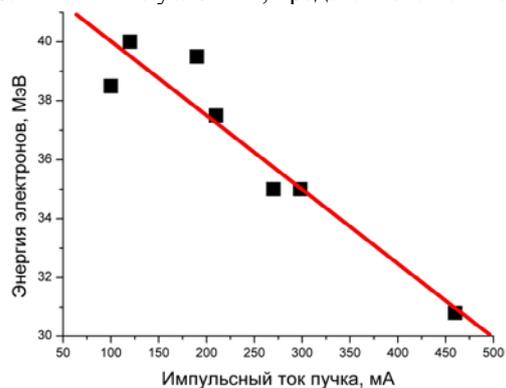


Рис.13. Подгрузка ускоряющей системы пучком

Большой разброс данных при малых токах связан с влиянием неконтролируемых наводок на индикацию значений тока от датчика тока.

### ВЫВОДЫ

После запуска система работала на программу облучения более чем полгода и показала свою эффективность. Выявленную нестабильность источника питания магнита сканатора предполагается устранить путем замены элементной базы.

Авторы благодарят В.В. Митроченко и В.Ф. Жигло за продуктивное обсуждение и помощь в создании установки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. M.I. Ayzatskiy, V.N. Boriskin, A.N. Dovbnaya, V.A. Kushnir, V.A. Popenko, V.A. Shendrik, Yu.D. Tur, A.I. Zykov. THE NSC KIPT electron li-

nacs - R&D // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Investigations»* (33). 2003, №2, p.19-25.

2. A.N. Dovbnaya, A.I. Kosoj, A.E. Tolstoj, V.A. Shendrik. The Output Beam Scanning and Forming in the Multipurpose Electron Accelerators of KIPT // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Research»* (28). 1997, v.1, p.114-121.
3. V.N. Boriskin, A.N. Savchenko, A.A. Sarvilov, D.L. Stepin, G.N. Tsebenko, A.S. Chepurnov, I.V. Gribov. CANopen Connected Power Supply Control Systems for the Electron Linacs // *Proceedings of RuPAC-2010*, Protvino, Russia, p.266-268.
4. В.Н. Борискин, В.А. Гури́н, Л.В. Репринцев, В.И. Татанов, Г.Н. Цебенко. Разработка и исследование устройств формирования тока в сканирующем магните на выходе ЛУЭ // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Nuclear Physics Research»* (29,30). 1997, v.2,3, p.168-169.
5. V.N. Boriskin, V.A. Gurin, A.N. Dovbnaya, V.A. Popenko, L.V. Reprintsev, A.N. Savchenko, D.L. Stepin, V.I. Tatanov, V.A. Shendrik. Magnetic Induction Monitor Measurements of Beam Spatial Characteristics in Technological Electron Linear Accelerators // *Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference*, Chicago, p.1336-1338.
6. В.Н. Борискин, Л.К. Мякушко, Л.В. Репринцев и др. Диагностика вывода мощного электронного пучка и быстрая защита оборудования технологического ускорителя ЛУ-10 // *Тезисы XXI Международного семинара по ускорителям заряженных частиц*, Алушта 2009, с.56.

Статья поступила в редакцию 26.09.2011 г.

### SYSTEM OF THE ENERGY FILTER FOR ACCELERATOR "EPOS"

*V.N. Boriskin, I.S. Guk, A.N. Dovbnaya, R.M. Dronov, G.G. Koval'ev, S.G. Kononenko, L.K. Myakushko, A.O. Mytsykov, V.O. Popenko, L.V. Reprintsev, V.P. Romasko, A.S. Tarasenko, V.I. Tatanov, V.A. Shendrik, V.M. Scherbinin*

In preset time two-sectional linear accelerator "EPOS" is used for irradiation the materials and products in the energy range up to 35 MeV with the mean power of the beam up to 12 kW. Some of radiation technologies demand to exclude the hitting of electrons with energy below 17 MeV on the targets which are being irradiated. For fulfillment of this requirement on the accelerator, it was designed, manufactured and put into operation the system of the energy filter which consists of dipole magnet with constant magnetic field and a magnet with a variable magnetic field, intended for beam scanning on the target. The system includes also two cooled collimators and monitor for beam parameters measuring.

### СИСТЕМА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ФІЛЬТРА ДЛЯ ПРИСКОРЮВАЧА «ЭПОС»

*В.М. Борискин, І.С. Гук, А.М. Довбня, Р.М. Дронов, Г.Г. Ковальов, С.Г. Кононенко, Л.К. Мякушко, А.Ю. Мициков, В.О. Попенко, Л.В. Репринцев, В.П. Ромасько, О.С. Тарасенко, В.І. Татанов, В.А. Шендрик, В.М. Щербінін*

Лінійний двосекційний прискорювач «ЭПОС» зараз використовується для радіаційної обробки при енергіях до 35 MeV з середньою потужністю в пучку до 12 кВт. Ряд радіаційних технологій вимагає виключити попадання електронів з енергією менше 17 MeV на мішені. Для того, щоб задовольнити цю вимогу, розроблена, виготовлена і введена в експлуатацію система енергетичного фільтра, яка складається з дипольного магніту з постійним полем та магніту зі змінним полем, який використовується для розгортки пучка на мішені. Система містить також два охолоджуваних коліматора та датчики, які вимірюють параметри та положення пучка.