

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА**

УДК 621.384.64

**МАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОГО КАНАЛА  
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ<sup>1</sup>**

© 2024 г. И. В. Кильметова<sup>a,\*</sup>, Г. Н. Кропачев<sup>a</sup>, Т. В. Кулевой<sup>a</sup>, А. И. Семенников<sup>a</sup>, О. С. Сергеева<sup>a</sup>, В. С. Скачков<sup>a</sup>, Е. Р. Хабибуллина<sup>a</sup>,  
А. С. Борисков<sup>b</sup>, А. М. Опекунов<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Национальный исследовательский центр  
"Курчатовский институт"*

*Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

<sup>b</sup> *Всероссийский научно-исследовательский*

*институт экспериментальной физики (ВНИИЭФ)*

*Россия, 607188, Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37*

*\*e-mail: irina.kilmetova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 04.12.2023 г.

После доработки 07.03.2024 г.

Принята к публикации 30.03.2024 г.

В НИЦ "Курчатовский институт" – ККТЭФ разрабатывается импульсный линейный ускоритель тяжелых ионов с энергией 4 МэВ/нуклон и током до 10 мА. В низкоэнергетичном канале транспортировки (ЛЕВТ) ионного пучка сразу после лазерного источника предусматривается рафинирование целевой фракции ионов с отношением  $A/Z = 4-8$  из первично сформированного пучка с широким спектром по зарядности и согласование поперечных характеристик пучка при инжекции в ускоряющую секцию RFQ. Представлены результаты моделирования улучшенных конструкций импульсного соленоида и двух постоянноточных отклоняющих электромагнитов с углом поворота  $60^\circ$ . Оптимизация конструкций осуществлена с учетом результатов динамических расчетов, выполненных путем моделирования движения ионов в 3D-распределении магнитного поля на всем протяжении канала ЛЕВТ от его входа до выхода, и коррекции режимов электропитания.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Разработанные конструкции элементов магнитной оптики каналов ЛУ2 [1]: ЛЕВТ [2] и DTL прошли стадию проверки и подтверждения качества пространственного

---

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц "RuPAC'23", Новосибирск.

распределения магнитного поля путем непосредственного 3D-моделирования динамики пучка на всем протяжении ускорителя от лазерного источника ионов до обдирочной мишени. На основе результатов динамических расчетов решено принять полученные конструкции магнитных элементов ЛУ2 в качестве основы для технического проектирования на предприятии-изготовителе.

## 2. ОТКЛОНЯЮЩИЕ МАГНИТЫ

Отклоняющий магнит ВМ ЛЕВТ, расчетная модель которого показана на рис. 1а, является составным элементом начальной части ЛЕВТ, осуществляющей сепарацию ионов штатной зарядности ионного пучка. Для обеспечения независимости монтажа магнита и установки ионопровода конструкция отклоняющего магнита предусматривает его многократную разборку на две составные части.

В табл. 1 представлены характеристики отклоняющего магнита ЛЕВТ. Размер области, где выполняется допуск на неоднородность магнитного поля (Good Field Region, GFR), обеспечивает прохождение пучка размером до  $\pm 40/\pm 30$  мм. В строке “Габариты  $W \times H \times L$ ” дана длина  $L$  отрезка средней линии магнита (окружность радиуса, равного требуемому радиусу поворота пучка) в плоскости поворота пучка в пределах между входным и выходным торцами, а также ширина  $W$  и высота  $H$  магнита. Количество поворотных магнитов этого типа на канале ЛЕВТ – два.

Продольное распределение поля и интеграл от него, показанные на рис. 1б, рассчитаны вдоль средней линии магнита.

Объединяющий магнит СВМ ЛЕВТ, расчетная модель которого показана на рис. 2, выводит пучок на оптическую ось ускорительной секции RFQ. Он вслед за ВМ ЛЕВТ осуществляет более глубокую сепарацию ионов штатной зарядности ионного пучка.

**Таблица 1.** Расчетные параметры ВМ ЛЕВТ

Конструкция ВМ ЛЕВТ – разъемная, состоит из	двух частей
Угол поворота пучка	60°
Радиус поворота пучка, мм	400
Межполюсный зазор, мм	108
Ширина полюса, мм	300
Схема обмотки катушки: слоев $\times$ витков в слое	3 $\times$ 20 = 60
Число витков в обмотке	120
Сечение провода (шинка с каналом охл.), мм <sup>3</sup>	12 $\times$ 12 $\times$ $\varnothing$ 6
Интегральный ток, кА/катушку	10.5

Номинальный ток возбуждения, А	175
Материал магнитопровода	Сталь 3408
Поле: в центре зазора × в сердечнике × в ярме, Тл	0.25 × 0.6 × 1.6
Интеграл магнитного поля вдоль продольной оси, Тл·м	0.13
Допустимая неоднородность поля (в GFR), $\Delta B/B$ , %	0.3
Электрическое сопротивление обмотки, мОм	32
Напряжение на обмотке при номинальном токе, В	5.6
Мощность рассеяния, Вт	980
Охлаждение линзы	Водяное
Габариты: ширина × высота × длина, мм <sup>3</sup>	560 × 770 × 480

**Рис. 1.** Отклоняющий магнит BM LEBT: **а** – расчетная модель в сборе, **б** – продольное распределение поля и интеграла поля вдоль средней линии магнита.

**Рис. 2.** Вид объединяющего магнита LEBT ЛУ2 (верхняя половина магнита снята).

**Рис. 3.** Определение угла скоса торцов объединяющего магнита LEBT ЛУ2.

Положение области, отведенной для прохождения ионного пучка, выделено синим цветом; оранжевая линия на этой области – средняя линия пучка. Оранжевый шестиугольник – профиль полюса магнита, выведенный в медианную плоскость.

На рис. 3 показана ориентация плоскостей торцов относительно линии падения/вылета пучка на плоскость входного/выходного торцов магнита, причем

- на входном торце пучок (красная стрелочка в нижнем правом углу рисунка), двигаясь вдоль средней линии, подходит к входному торцу так, что линия его движения и нормаль к плоскости входного торца образуют угол  $30^\circ$ , называемый углом скоса торца;
- на выходном торце магнита пучок (красная стрелочка вблизи системы координат), уже повернутый на заданный угол поворота  $60^\circ$ , направлен под прямым углом к плоскости выходного торца. Здесь угол скоса торца равен нулю.

В табл. 2 представлены характеристики объединяющего магнита СВМ LEBT. Размер области, где выполняется допуск на неоднородность магнитного поля, обеспечивает прохождение пучка размером до  $\pm 40/\pm 30$  мм, а также дополнительную свободу подстройки поперечного положения магнита в пределах до  $\pm 2$  мм. Интеграл магнитного поля вычислен вдоль средней линии магнита, показанной на рис. 2 и 3.

Распределение поля и интеграла поля в собирающем магните CBM LEBT вдоль средней линии магнита аналогично соответствующим распределениям в магните BM LEBT (рис. 1б).

**Таблица 2.** Расчетные параметры CBM LEBT

Конструкция – разъемная, состоит из	двух частей
Количество поворотных магнитов	1
Радиус поворота пучка, мм	400
Угол поворота пучка	60°
Угол наклона средней линии к нормали торцов в точках влета/вылета иона	30°/0
Межполюсный зазор, мм	108
Ширина полюса на выходном торце, мм	200
Схема обмотки катушки: слоев × витков в слое	3 × 15 = 45
Число витков в обмотке	90
Сечение провода (с каналом охл.), мм <sup>3</sup>	12 × 12 × Ø 6
Интегральный ток, кА/катушку	11
Номинальный ток возбуждения, А	245
Материал магнитопровода	сталь 3408
Поле в центре зазора, Тл	0.25
Интеграл магнитного поля вдоль средней линии, Тл·м	0.129
Good Field Region (GFR), ширина/высота, мм	±100/±50
Допустимая неоднородность поля (в GFR), ΔB/B, %	0.3
Электрическое сопротивление обмотки, мОм	25
Напряжение на обмотке при номинальном токе, В	6
Мощность рассеяния, кВт	1.5
Охлаждение магнита	Водяное
Габариты: ширина × высота × длина, мм <sup>3</sup>	784 × 708 × 480

В табл. 3 представлены результаты теплового расчета для условий питания, указанных в табл. 2.

**Таблица 3.** Режим охлаждения CBM LEBT

Схема соединения катушек по воде	параллельное
Длина канала охлаждения в катушке, м	73.3
Перепад давления, атм (кПа)	4.6 (466)
Скорость протока воды в канале, м/с	1.6
Расход воды на обмотку, л/мин	5
Перепад температуры хладагента, К	4

3.

#### 4. СОЛЕНОИД LEBT

Соленоиды LEBT являются элементами сепарирующей и согласующей частей этого канала. На рис. 4 показаны распределения поля и его продольного интеграла, использовавшиеся при расчетах динамики протонного пучка как на выходе ионного источника, так и на участке ввода пучка в секцию RFQ. В табл. 4 показаны результаты электромагнитных расчетов соленоида и соответствующих параметров разрядного контура для импульсного питания соленоида. Параметрами вариации при расчетах были схема намотки, размеры шинки и емкость накопителя разрядного контура. Задачей расчетов было получение удобного для практики режима импульсного питания при заданных значениях: 1) величины поля в максимуме импульса тока питания – 1 Тл, 2) ампервитков – 330 кА-вит, 3) средней мощности рассеяния – около 100 Вт при частоте повторения импульсов – 1 Гц.

**Рис. 4.** Продольное распределение поля и его интеграла вдоль оптической оси соленоида LEBT.

**Таблица 4.** Параметры соленоида LEBT

Число штатных соленоидов в LEBT	3
Режим питания	Импульсный
Магнитная апертура, мм	Ø150
Длина, мм	400
Поперечные размеры обмотки, мм <sup>2</sup>	Ø150 × Ø247
Ярмо, мм <sup>3</sup>	Ø248 × Ø288 × 400
Поле в центре рабочей области, Тл	1.03
Интеграл поля в продольном направлении, Тл·м	0.41
Схема намотки: слоев × витков в слое = всего	4 × 40 = 160
Шинка медная (с каналом охл.), мм <sup>3</sup>	10 × 10 × Ø6 = 70

Условие охлаждения	Водяное
Электрические параметры, $R \cdot L \cdot C$ , мОм·мГн·мкФ	23 · 1.7 · 250
Импульсное питание соленоида: $I_{\text{ном}} \cdot U_c \cdot \langle P \rangle$ , А·кВ·Вт	2070 · 5.4 · 100
$T_{\text{имп}}$ (полусинусоида), мс	2
Частота повторения, Гц	1

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитные элементы LEBT рассчитаны в режиме исследования зависимости основных характеристик ионного пучка от выбора типов элементов магнитной оптики, а также от схемы их расстановки в канале и настройки их режимов функционирования. Для повышения эффективности транспортировки и обеспечения требуемых выходных кинематических параметров ионного пучка предпринята стратегия интенсивного отделения целевой фракции от многокомпонентного по зарядности первичного сгустка и постадийной оптимизации настройки режимов. В результате получен весьма компактный и плотно упакованный канал, обеспечивающий требуемую инжекцию в RFQ глубоко рафинированного пучка штатной фракции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулевой Т.В., Завьялов Н.В., Кропачев Г. Н. и др. Линейный ускоритель тяжелых ионов ЛУ2 для синхротронного исследовательского комплекса (СКИ). // ПТЭ “RuPAC’23”
2. Хабибуллина Е.Р., Кропачев Г.Н., Кулевой Т.В. и др. Низкоэнергетический канал транспортировки (LEBT) линейного ускорителя тяжелых ионов. // ПТЭ “RuPAC’23”

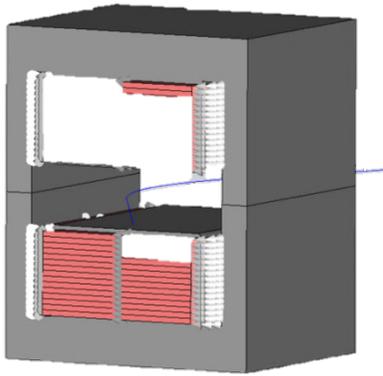
## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рисунок 1. Отклоняющий магнит ВМ ЛЕВТ: **а** – расчетная модель в сборе, **б** – продольное распределение поля и интеграла поля вдоль средней линии магнита.

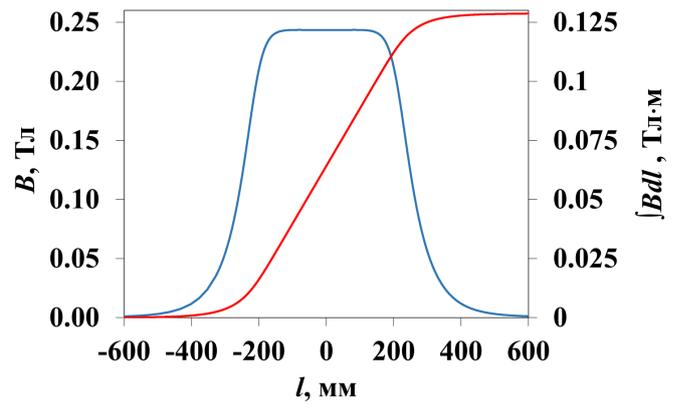
Рисунок 2. Вид объединяющего магнита ЛЕВТ ЛУ2 (верхняя половина магнита снята).

Рисунок 3. Определение угла скоса торцов объединяющего магнита ЛЕВТ ЛУ2.

Рисунок 4. Продольное распределение поля и его интеграла вдоль оптической оси соленоида ЛЕВТ.



(a)



(б)

Рис.1

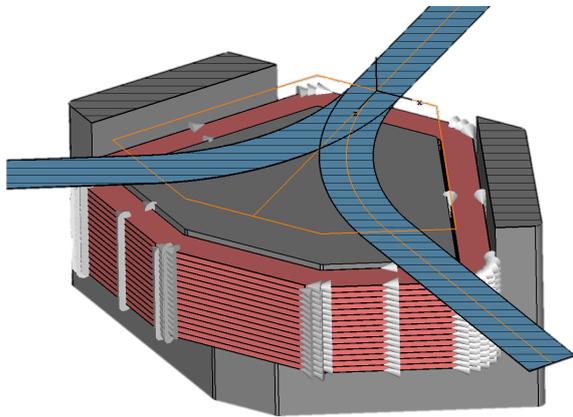


Рис.2

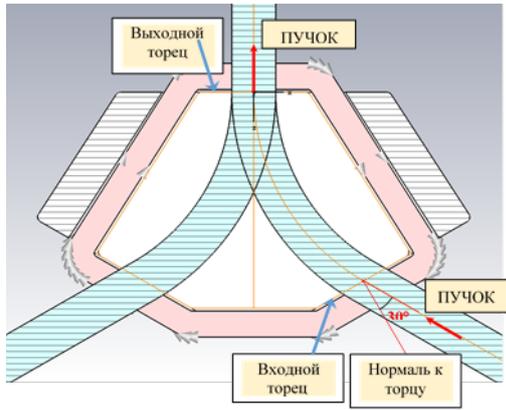


Рис. 3

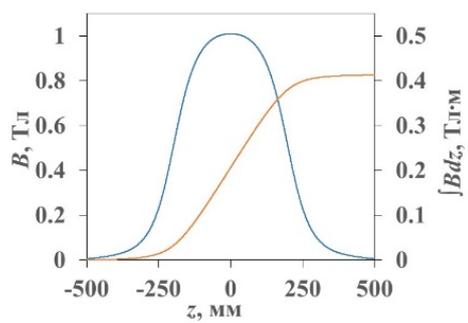


Рис.4

**Для связи с авторами:**

**Кильметова Ирина Владиславовна**

[irina.kilmetova@yandex.ru](mailto:irina.kilmetova@yandex.ru)

**Тел: 8-965-926-53-35 (моб.)**

**Кулевой Тимур Вячеславович**

[kulevoy@itep.ru](mailto:kulevoy@itep.ru)

**Сергеева Ольга Сергеевна**

[sergeeva@itep.ru](mailto:sergeeva@itep.ru)

**Скачков Владимир Сергеевич**

[skachkov@itep.ru](mailto:skachkov@itep.ru)

~~**Для переводчика:**~~

~~**Magnetic elements of a low energy channel for a heavy ion accelerator**~~

~~A pulsed linear heavy ion accelerator with an energy of 4 MeV/nucleon and a current of up to 10 mA is being developed at the Kurchatov Institute — КСТЕР. In the low energy ion beam transportation channel (LEBT), immediately after the laser source, refining of the target ion fraction with a ratio  $A/Z = 4 \div 8$  from the initially formed beam with a wide charge spectrum and matching of the transverse characteristics of the beam during injection into the RFQ accelerating section is provided. The paper presents the results of modeling improved designs of a pulsed solenoid and two constant current deflecting electromagnets with a rotation angle of  $60^\circ$ . The optimization of the structures was carried out taking into account the results of dynamic calculations performed by modeling the movement of ions in the 3D distribution of the magnetic field throughout the LEBT channel from its entrance to the exit, and correction of power supply modes.~~