

РАЗРАБОТКА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ ЛИНЗ ДЛЯ ФОКУСИРОВКИ ПУЧКОВ ЛЕГКИХ ИОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ПОРЯДКА 10 МэВ

В.И. Бутенко, О.С. Друй, Б.И. Иванов, В.О. Ильичева, Н.Г. Шулика, О.Н. Шулика, В.Б. Юферов

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина

Разработаны компьютерные программы для расчета фокусировки широкоапертурных интенсивных ионных пучков, на основе которых проведена оптимизация линз. С учетом имеющегося практического опыта по изготовлению сверхпроводящих соленоидов, выполнены инженерные расчеты и эскизный проект сверхпроводящих магнитных линз для фокусировки пучков дейтронов с энергией до 20 МэВ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводящие (СП) магнитные линзы (в виде коротких соленоидов) могут быть применены как для радиальной фокусировки ионов в процессе ускорения, так и для фокусировки ионных пучков, ускоренных до значительных энергий. Применение цилиндрических линз известно для фокусировки пучков заряженных частиц малых энергий. Однако, с повышением энергии частиц требуются большие величины магнитных полей, поскольку фокусное расстояние тонкой линзы (длина линзы существенно меньше фокусного расстояния) определяется соотношением (см., например, [1]):

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8mU} \int_{-\infty}^{+\infty} B^2(z) dz, \quad (1)$$

где B – магнитная индукция, U – ускоряющий потенциал, e и m – заряд и масса частицы.

Для энергий порядка 10 МэВ нужны величины магнитного поля на уровне 5 Тл, что требует применения СП-линз. На практике для таких целей СП-линзы применяются редко. В частности, в [2] описаны результаты применения длинного СП-солеоида для обеспечения радиальной устойчивости пучка протонов в процессе ускорения в линейном ускорителе протонов СИУ-1 (МРТИ). В результате такого применения получен ток пучка около 400 мА, но при значительном разбросе частиц по энергиям. В то же время авторы [2] отмечают, что не достигли расчетных параметров системы. В [3] для реализации мощных линейных ускорителей ионов предложена схема на основе модифицированной переменнo-фазовой фокусировки, в которой для согласования секций применяются короткие СП-соленоиды с напряженностью магнитного поля в несколько тесла. Результаты компьютерного моделирования ускорения дейтронов в таком ускорителе [3] показывают целесообразность предложенного подхода.

2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОКУСИРОВКИ ДЕЙТРОНОВ

В работе путем компьютерного моделирования проведены расчеты фокусировки широкоапертурных ионных пучков, на основе которых проведена

оптимизация линз по минимуму фокусного расстояния в следующих случаях: 1) по соотношению длины и толщины намотки, 2) по минимальной длине СП-провода (см. Рис.1-4).

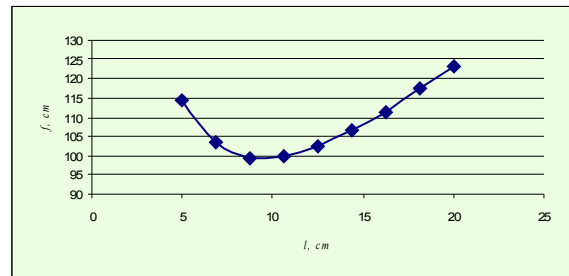


Рис.1. Фокусировка параллельного пучка дейтронов с энергией 20 МэВ (вариант 1)

На Рис.1 представлены результаты оптимизации линзы по минимуму фокусного расстояния при постоянной площади сечения намотки (внутренний радиус 4 см, наружный радиус и длину требуется определить, сечение намотки 45 см², средняя плотность тока 15614 А/см². Выбрано: длина линзы 10 см, наружный радиус около 8.5 см, при этом фокусное расстояние равно 98 см, напряженность магнитного поля в центре линзы $H_{00}=57.668$ кЭ.

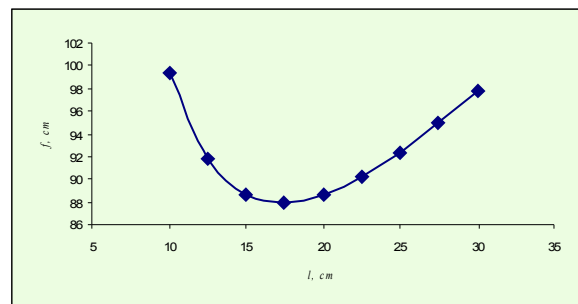


Рис.2. Фокусировка параллельного пучка дейтронов с энергией 20 МэВ (вариант 2)

На Рис.2 представлены результаты оптимизации линзы по минимуму фокусного расстояния при постоянной длине провода (внутренний радиус линзы 3,5 см, наружный радиус и длину требуется определить, средняя плотность тока 15614 А/см², длина провода 2,87 км – такая же, как для Рис.1). В результате такой оптимизации при длине линзы

17.5 см фокусное расстояние уменьшилось с 98 до 88 см.

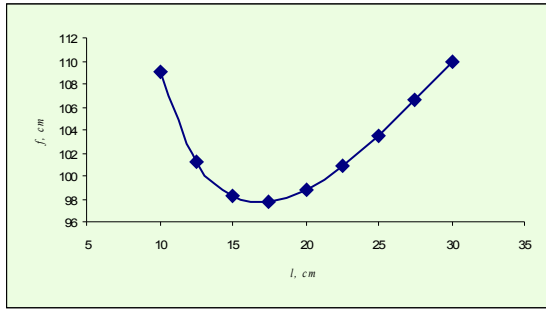


Рис.3. Фокусировка параллельного пучка дейтронов с энергией 20 МэВ (вариант 3)

На Рис.3 представлены результаты оптимизации линзы по минимуму длины провода при сохранении фокусного расстояния (внутренний радиус 3,5 см, наружный радиус и длину требуется определить, средняя плотность тока 15614 А/см²). При длине линзы 17 см, фокусном расстоянии 98 см (таком же, как на Рис.1) получили длину провода 2,67 км, то есть на 200 м меньше по сравнению с данными Рис.1, 2.

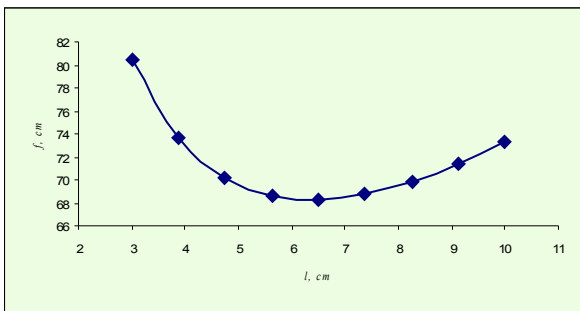


Рис.4. Фокусировка параллельного пучка дейтронов с энергией 3 МэВ

На Рис.4 представлены результаты оптимизации линзы по минимуму фокусного расстояния при постоянной площади сечения катушки линзы (внутренний радиус 3,0 см, сечение катушки 18 см², наружный радиус и длину требуется определить, средняя плотность тока 15614 А/см²). В результате оптимизации выбрано: длина линзы 6 см, наружный радиус 6 см. Напряженность магнитного поля в центре линзы $H_{00}=33$ кЭ.

После выбора оптимальных параметров соленоидальных СП-линз был проведен расчет фокусировки широкоапертурного пучка дейтронов с энергией 20 МэВ с начальными условиями, соответствующими результатам предварительно проведенного компьютерного моделирования линейного ускорителя [3]. Результаты представлены на Рис.5.

Как видно из Рис.5, фокус непараксиальных и слегка расходящихся лучей находится в области $z=157...160$ см. Отметим, что для параллельных параксиальных лучей фокусное расстояние в данном случае составляет около 100 см, что следует как из компьютерного моделирования, так и из расчета по формуле (1). Минимальный радиус пучка, или кроссовер, который в данном случае определяется непараксиальностью пучка (поскольку траектории

частиц с большим радиусом инжекции преломляются сильнее), составляет 0.08 см при $z=150$ см.

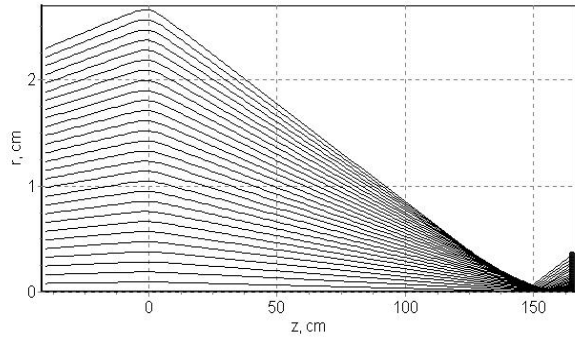


Рис.5. Фокусировка дейтронов 20 МэВ. Радиус пучка на выходе из ускорителя $r_0=2.3$ см, угол разлета $=10$ мрад $\cdot r/r_0$. Рассчитаны траектории дейтронов в линзе с параметрами: внутренний радиус 4 см, длина 10 см, наружный радиус около 8,5 см при средней плотности тока 15614 А/см². Напряженность магнитного поля в центре линзы $H_{00}=57,7$ кЭ

На Рис.6,7 приведено распределение относительной плотности тока дейтронов по радиусу в фокальной плоскости и в области кроссовера.

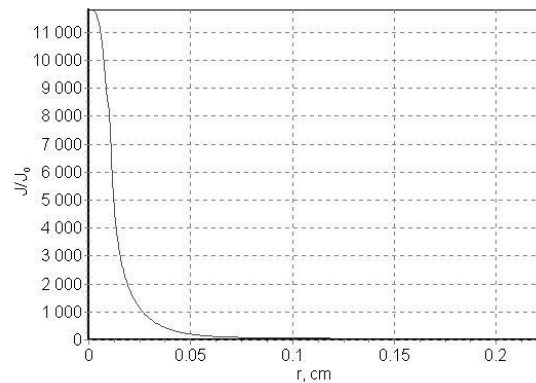


Рис.6. Распределение относительной плотности тока дейтронов по радиусу в фокальной плоскости

Максимальная относительная плотность тока дейтронов на оси при $z=157,8$ см составляет 11500 А/см². В основном она определяется параксиальными лучами.

При большой плотности мощности пучка мишень (полоска фольги) по мере облучения должна перематываться с катушки на катушку, либо располагаться на внешнем крае вращающегося диска, плоскость которого перпендикулярна пучку.

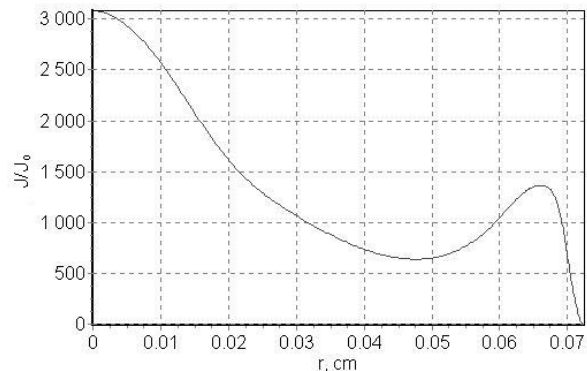


Рис.7. Распределение относительной плотности тока дейтронов по радиусу в области минимального сечения пучка

На Рис.8 представлена схема облучения дейтронами образца в специальной камере, обеспечивающей радиационную безопасность.

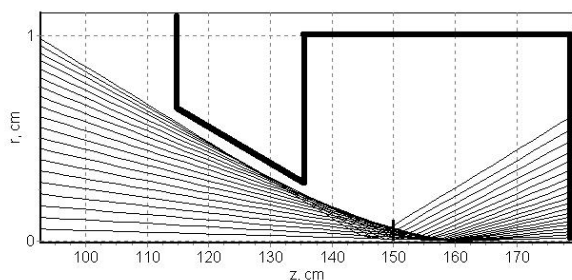


Рис.8. Прием пучка на мишень в радиационно-экранирующей камере («мини-могильнике»)

При среднем радиусе входного отверстия 0.5 см максимальная толщина передней защитной стенки составляет 20 см. Реально внутренние границы радиационно-экранирующей камеры должны быть существенно больше, чем показано на рисунке, — для значительного уменьшения потока вторичной радиации через входное отверстие. На Рис.8 мишень расположена в кроссовере пучка. В зависимости от среднего тока пучка и оптимального времени экспозиции, можно выбрать размеры и место расположения мишени после кроссовера, а переднюю защитную стенку поставить в области кроссовера, тем самым уменьшив выход вторичной радиации через отверстие для входа пучка.

3. РАЗРАБОТКА ЭСКИЗНОГО ПРОЕКТА СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ ЛИНЗ

3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СП-ЛИНЗ

В предлагаемом нами случае для двух ускорителей дейтронов с энергиями: 1...5 и 20 МэВ фокусирующая система независима от ускоряющей, и ее свойства задаются величиной магнитного поля H фокусирующего магнита. Как указывалось, фокусирующие системы такого типа могут быть применены для ускорителей с энергией 10...20 МэВ при величинах магнитного поля 5...10 Тл, снимая некоторые проблемы, которые появляются при использовании квадрупольных линз. Следует заметить, что в отличие от тепловых магнитов, для сверхпроводящих систем энергия, потребляемая магнитом, не зависит от величины магнитного поля, а зависит только от габаритов магнитной системы и слабо зависит от ее весовых параметров, поскольку нет внутреннего тепловыделения, а есть теплоподвод через внешнюю границу и токовводы.

Основные требования к СП-соленоидам-линзам перечислены ниже. Фокусирующий соленоид для дейтронов с энергией 1...5 МэВ должен иметь следующие параметры: вакуумное отверстие диаметром 80 мм с температурой стенок 300 К для прохождения пучка, внутренний радиус соленоида 50 мм.

Внешний радиус соленоида не регламентирован и будет определен при выборе плотности тока. Длина соленоида 60 мм, магнитное поле на оси в середине соленоида до 3,3 Тл. Фокусирующий соленоид для дейтронов с энергией 20 МэВ имеет параметры: вакуумное отверстие диаметром 80 мм с температурой стенок 300 К для прохождения фокусируемого пучка, внутренний радиус соленоида 50 мм, внешний радиус соленоида также не регламентирован и будет определен расчетным путем. Длина соленоида 100 мм, магнитное поле на оси, в середине катушки, 5,6 Тл. Исходя из величин магнитных полей до 10 Тл, материалом обмотки может быть кабель НТ-50УК. Более подробные характеристики различных типов кабеля представлены в Табл.1.

Таблица 1. Параметры кабеля МНТ-0.57-109, NbTi/Cu 1-0.75 и кабеля НТ-50УК

Кабель	Диаметр, мм	Критический ток, А					
		4 Т	5 Т	6 Т	7 Т	8 Т	9 Т
МНТ-50-0,57-109	2.0		2800	2300	1800	1500	1200
	1.0		850	700	580	480	300
NbTi/Cu 1-0.75	0.7		550	450	360	230	190
	0.5		220	190	165	125	95
НТ-50-1.5УК	1.5	470	450	350			

При анализе траекторий частиц в области фокусирующей СП-линзы не зафиксированы траектории, выходящие на стенки канала, поэтому для данного случая нет необходимости учитывать радиационно-зависимые характеристики сверхпроводящих материалов.

3.2. ТРЕБОВАНИЯ И ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ И ПАРАМЕТРОВ СП-ЛИНЗ

Рассмотрены "лабораторный" и "промышленный" варианты изготовления и эксплуатации криогенного обеспечения СП магнитных линз. "Промышленный" вариант требует длительной, максимально автоматизированной эксплуатации при определенных капитальных затратах. "Лабораторный" вариант требует относительно меньших капитальных затрат при коротком периоде эксплуатации, т.е. не требуется особо минимизировать теплоподводы за счет стоимости изготовления и последующей кратковременной эксплуатации. Для обоих этих случаев конструктивные решения оказываются различными. Соленоид для ускорителя 1...5 МэВ следует отнести к классу "лабораторных" соленоидов с указанными выше требованиями. Длительность эксперимента – 1-5 суток, возможные хладагенты – жидкие азот и гелий. Соленоид 20 МэВ ускорителя следует отнести к классу "промышленных" соленоидов, требующих минимального обслуживания при круглосуточной эксплуатации в течение года, хотя возможна его работа и в "лабораторном" режиме.

Конструкция криогенной системы для линзы "лабораторного" типа выполнена с использованием ем-

костей с жидкими гелием и азотом и охлаждаемыми газообразным отходящим гелием токовводами. Здесь возможен подвариант с использованием высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) токовводов на уровень температур около 80...105 К (стоимость около \$100 за 1 кА·м).

На Рис.9 представлен схематический вид криосистемы СП-соленоида "лабораторного" типа.

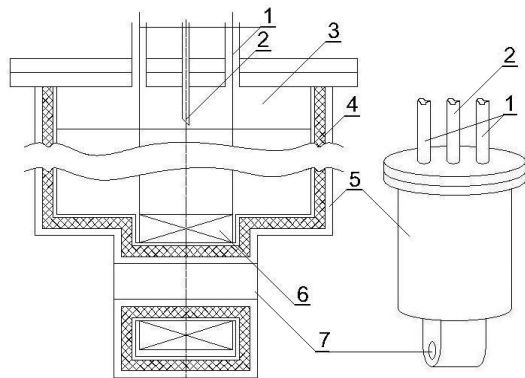


Рис. 9. Схематический вид криосистемы соленоида: 1 – токовводы соленоида; 2- переливалка для залива жидкого гелия; 3 – объем с жидким гелием или область размещения криогенератора; 4 - слоистая вакуумная теплоизоляция или азотный экран; 5 – корпус дьюара или криогенератора; 6 – соленоид; 7 – отверстие для ввода пучка

В Табл.2 представлены расчетные параметры СП магнитных линз для фокусировки широкоапертурных интенсивных ионных пучков с энергиями 20 МэВ (5,5 Т) и 5 МэВ (3,3 Т).

Таблица 2. Расчетные параметры СП-линз

Геометрия соленоидов	2a ₁ =100 мм, 2a ₂ =300 мм, l=100 мм: α=3,0, β=1,0	2a ₁ =100 мм, 2a ₂ =250 мм, l=60 мм: α=2,5, β=0,6
H _{max} /H ₀	6,65/5,8	4,3/3,3
Кабель (мм)	НТ-50 (Ø=1,5)	НТ-50 (Ø=1,5)
Число витков	3500	1575
Транспортный ток (А)	280	300
Плотность тока (А/см ²)	1,4 · 10 ⁴	1,5 · 10 ⁴
Длина провода (м)	2200	865

Расчет магнитного поля на оси линзы проводился по формуле [4]:

$$H_0 = \frac{NI}{a_1} \frac{1}{2\beta(\alpha - 1)} F(\alpha, \beta),$$

$$F(\alpha, \beta) = 0,4\pi\beta \ln \frac{\alpha + (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2}}{1 + (1 + \beta^2)^{1/2}},$$

где N – число витков, I – ток в соленоиде, a_1 и a_2 – внутренний и внешний радиусы соленоида, $\alpha = a_2/a_1$, $\beta = b/a_1$, $l = 2b$ – длина соленоида, $F(\alpha, \beta)$ – форм-фактор.

3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПОДВОДОВ

Для расчета тепловых характеристик используется уравнение теплового баланса: $Q = \sum Q_i$. Здесь Q_1 – теплоподвод к поверхности магнита за счет теплового излучения (эквивалент величины σT^4); Q_2 – теплоподвод по подвесам и опорам – эквивалент уравнения Фика – $\sum \lambda_i \Delta T s_i / l_0$, где λ_i – теплопроводности материалов при использовании комбинированных опор, ΔT – разность температур, s_i – сечения различных материалов, теплоизоляторов в комбинированной опоре, l_0 – длина опоры; Q_3 – теплоподвод по токовводам, который пропорционален квадрату тока I^2 , удельному сопротивлению материалов ρ , геометрическим параметрам токовводов r , l – радиусу и длине токоввода, коэффициентам теплопередачи от холодного газообразного гелия к деталям токовводов σ .

Для "лабораторной" и "промышленной" системы охлаждения СП-линз получаем разные значения теплоподводов и теплопотерь и, соответственно, разные конструкции. Нагрузкой является собственно соленоид, с $T = 4$ К и внешней поверхностью $S \approx 1.1 \cdot 10^3$ см². При использовании слоисто-вакуумной изоляции без охлаждаемого жидким азотом экрана, радиационный теплоподвод к такой системе может быть получен на уровне 10⁻² Вт. Охлаждаемые протоком газообразного гелия оптимизированные токовводы дают теплоподвод на уровне (7...10) · 10⁻⁴ Вт/А, т.е. при токе до 500 А, теплоподвод к соленоиду будет менее 1.0 Вт, что соответствует испарению LHe 1.7 л/ч, т.е. приблизительно ≈40 л/сутки. Танк-дьюар такого объема имеет поверхность около 1.0 · 10⁴ см² и, соответственно, теплоприток на уровне 0.1 Вт.

Второй вариант охлаждения магнитных линз выполняется с использованием двухуровневых криогенераторов на температуру 4 и 80 К с обязательным использованием ВТСП-токовводов.

При работе с криогенератором нет отходящих паров гелия, и токовводы не могут охлаждаться потоком газообразного гелия, и поэтому охлаждаются только с одного конца. Использование ВТСП-токовводов с критической температурой 80...105 К позволяет не иметь тепловыделений в системе соленоида и токовводов вплоть до температур экрана, т.е. 80...100 К. Теплоподвод по токовводам идет из области с температурой 300 К на поверхность с $T = 80$ К и составляет около 20 Вт, который должен сниматься первой ступенью криогенератора с температурой 80...105 К. Теплоприток в зону 4 К из-за малой величины теплопроводности ВТСП-материала лежит на уровне 0.1...0.2 Вт и снимается второй ступенью криогенератора.

ВЫВОДЫ

В работе путем компьютерного моделирования приведены расчеты фокусировки широкоапертурных ионных пучков, на основе которых проведена оптимизация линз по минимуму фокусного расстояния и определены траектории фокусируемых ионов дейтерия с энергией 20 МэВ.

Рассмотрены параметры СП магнитных линз для фокусировки широкоапертурных интенсивных ионных пучков с энергиями 20 МэВ (5,5 Т) и 5 МэВ (3,3 Т) и представлены варианты криогенного обеспечения.

Работа доложена на XX Международном семинаре по ускорителям заряженных частиц (Алушта, Крым, 9–15 сентября 2007 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.С. Зинченко. *Курс лекций по электронной оптике*. Харьков, Издательство ХГУ. 1958, 275 с.
2. В.М. Пироженко, О.В. Плинк. Линейный ускоритель протонов с фокусировкой пучка сверхпроводящим соленоидом и ускорением в

резонаторе со встречными вибраторами // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 1989, вып.6, с.30-33.

3. В.И. Бутенко, О.С. Друй, Б.И. Иванов, Н.Г. Шулика, О.Н. Шулика, В.Б. Юферов, В.О. Ильичева. Применение сверхпроводящих соленоидов для согласования секций в линейных ускорителях // *Тезисы XX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц* (Алушта, Крым, 9-15 сентября 2007 г.), с.111-112. Харьков, ННЦ ХФТИ, 2007.
4. Д. Монтгомери. *Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов*. М.: "Мир", 1971, 355 с.

Статья поступила в редакцию 18.01.2008 г.

SUPERCONDUCTING MAGNETIC LENS DEVELOPMENT FOR LIGHT ION BEAM FOCUSING AT ENERGY IN THE ORDER OF 10 MeV

V.I. Butenko, O.S. Druj, B.I. Ivanov, V.O. Il'icheva, N.G. Shulika, O.N. Shulika, V.B. Yuferov

There have been elaborated computer codes for simulation of wide-aperture intense ion beam focusing; the usage of these codes has allowed us to optimize lens parameters. Based on experience gained in superconducting solenoid fabrication, necessary technical calculations have been performed and a design project of superconducting magnetic lenses for deuteron beam focusing at energy of 1 and 20 MeV has been fulfilled.

РОЗРОБКА НАДПРОВІДНИХ МАГНІТНИХ ЛІНЗ ДЛЯ ФОКУСУВАННЯ ПУЧКІВ ЛЕГКИХ ІОНІВ З ЕНЕРГІЄЮ ПОРЯДКУ 10 MeV

В.І. Бутенко, О.С. Друй, Б.І. Іванов, В.О. Ільчова, М.Г. Шуліка, О.М. Шуліка, В.Б. Юферов

Розроблені комп'ютерні програми розрахунку фокусування широкоапертурних інтенсивних іонних пучків, на основі яких проведено оптимізацію лінз. З урахуванням практичного досвіду по виготовленню надпровідних соленоїдів, виконані розрахунки та ескізний проект надпровідних магнітних лінз для фокусування пучків дейтронів з енергією до 20 MeV.