

P9-2016-47

В. С. Александров, Н. Ю. Казаринов, И. Н. Мешков,
А. П. Сумбаев, А. В. Тузиков, В. Ф. Шевцов

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК
СОЛЕНОИДАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ПЕРВОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СЕКЦИИ
УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-200
НА ДИНАМИКУ ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Александров В. С. и др.

P9-2016-47

Влияние ошибок соленоидального магнитного поля первой ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200 на динамику пучка электронов

Представлен анализ результатов магнитных измерений, выполненных на макете фокусирующего соленоида ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200, и результаты численного моделирования динамики пучка в ускоряющей системе линейного ускорителя с учетом возможных ошибок, допущенных в фокусирующих полях ускорителя.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2016

Alexandrov V. S. et al.

P9-2016-47

Influence of Errors of a Solenoidal Magnetic Field of the First Accelerating Section of LUE-200 Accelerator on Electron Beam Dynamics

The analysis of results of the magnetic measurements executed on a breadboard model of the focusing solenoid of accelerating section of accelerator LUE-200, and results of numerical modelling of dynamics of a beam in accelerating system of the linear accelerator with the account of the possible errors admitted in focusing fields of the linac are presented.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является обработка, построение моделей и интерпретация результатов магнитных измерений, выполненных на макете фокусирующего соленоида, разработанного для первой ускоряющей секции линейного ускорителя электронов ЛУЭ-200 [1, 2], а также моделирование динамики пучка электронов с учетом возможных ошибок, допущенных в фокусирующих полях ускорителя. Расчеты динамики пучка электронов в ускоряющей структуре с бегущей волной 10-см диапазона проводились с помощью программы PARMELA для оптимизированных в работе [3] параметров элементов ускоряющей системы, элементов системы магнитной фокусировки ускорителя от источника электронов до конца ускоряющей структуры и элементов канала транспортировки пучка от выхода ускоряющей структуры до мишени.

1. МАКЕТ ФОКУСИРУЮЩЕГО СОЛЕНОИДА И УСТАНОВКА

Макет соленоида первой ускоряющей секции [4] составлен из двух серийных катушек. Каждая секция — катушка, намотанная медной шиной — трубкой с размерами сечения $12,5 \times 12,5$ мм с центральным отверстием $\varnothing 7,5$ мм в 10 слоев по 10 витков в каждом слое. Общие размеры катушки «по меди»: внутренний диаметр — 260 мм, наружный диаметр — 530 мм, осевая длина — 146 мм. 1-й ряд выполнен в виде вертикальной спирали (спираль Архимеда), к которому добавлены 10 слоев горизонтальной спирали по 9 витков в каждом с шагом намотки $h = 13$ мм. Расстояние между катушками «по меди» 20 мм. Конструкция катушек позволяет менять угол между плоскостью катушки и осью системы в пределах ± 10 мрад. Снаружи обмотки по внешнему радиусу закрыты экраном, выполненным из магнитной стали толщиной 6 мм. Эскиз макета соленоида представлен на рис. 1.

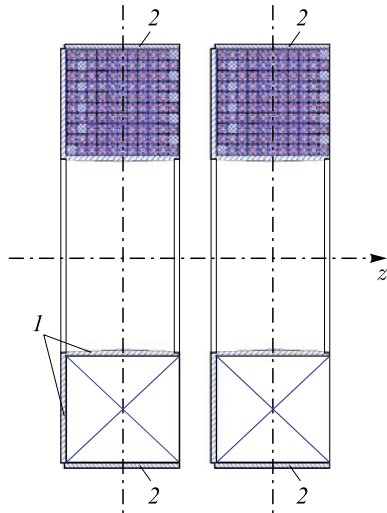


Рис. 1. Эскиз макета соленоида из двух серийных катушек фокусирующего соленоида первой ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200: 1 — каркас из немагнитного материала, 2 — ферромагнитный экран

Магнитные измерения и исследования возможностей коррекции магнитного поля соленоида проводились на магнитометрическом стенде [5] магнитометром МЗХ [6]. Система позиционирования измерительного пробника обеспечивает перемещение пробника в продольном (z) и радиальном (ρ) направлениях и вращение (φ) вокруг оси штанги, давая тем самым возможность измерения распределений компонент магнитного поля по трем независимым координатам цилиндрической системы: z , ρ и φ . Измерительный пробник включает в себя два датчика Холла (ДХг, измеряющий радиальную компоненту поля, и ДХз, измеряющий его аксиальную компоненту), расположенные на специальной штанге. Датчики ориентированы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, что позволяет производить в заданной точке измерение $B_z(z) - B_r(z)$ и $B_z(\varphi, \rho) - B_r(\varphi, \rho)$ компонент магнитного поля синхронно.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Предварительные измерения магнитного поля на макете соленоида производились при номинальном токе соленоида $I = 300$ А в приосевой области при изменении осевого положения пробника в диапазоне $0 \leq z \leq 470$ мм. Особенности распределения $B_r(\varphi)$ — компоненты магнитного поля исследовались в двух сериях измерений: в центре одной из катушек ($z = 140$ мм) — серия А и в центре второй катушки при $z = 350$ мм — серия В.

Результаты измерений серии А представлены на рис. 2 и в табл. 1. В измеренных азимутальных распределениях радиальной составляющей $B_r(\varphi)$ заметно наличие незначительной постоянной составляющей и синусоидальной составляющей, амплитуда которой определяет «качество» поля соленоида, т. е. $B_r/B_{z_{\max}}$, достигающее величины 10^{-2} и более. Наличие в $B_r(\varphi)$ постоянной составляющей объясняется, по всей видимости, наличием небольшого угла наклона плоскости кристалла датчика Холла ДХг к оси макета, что приводит к вкладу в измеренное значение B_r незначительной доли продольной составляющей поля B_z , пропорциональной углу наклона.

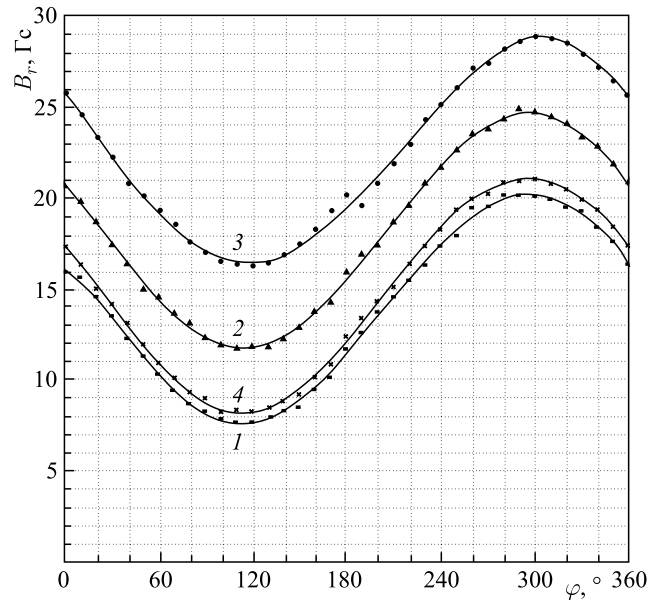


Рис. 2. Азимутальное распределение радиальной компоненты магнитного поля $B_r(\varphi)$ на различных радиусах положения ДХг: 1 — $r = 0$, 2 — $r = 1$ мм, 3 — $r = 2$ мм, 4 — $r = \langle -1 \rangle$ мм»

Таблица 1. $B_z (z = 140 \text{ мм}) = 1900 \text{ Гс}$

Кривая, r	$B_r, \text{ Гс}$					
	max	min	$\langle B_r \rangle$	ΔB_r	$\Delta B_r / B_z$	$\langle B_r \rangle / B_z$
1, $r = 0$	20,2	7,6	13,9	$\pm 6,3$	$\pm 3,2 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$
2, $r = 1 \text{ мм}$	24,8	11,8	18,3	$\pm 6,5$	$\pm 3,4 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-3}$
3, $r = 2 \text{ мм}$	29	16,2	22,6	$\pm 6,4$	$\pm 3,4 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
4, $r = \langle -1 \rangle \text{ мм}$	21	8,2	14,6	$\pm 6,4$	$\pm 3,3 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$

Примечание. Под B_r и B_z будем понимать компоненты магнитного поля, перпендикулярные плоскостям датчиков Холла ДХг и ДХz. Знак B_r в действительности противоположный.

В измерениях серии В обрабатывались способы снижения вклада B_z в измеряемое значение $B_r(\varphi)$ коррекцией угла наклона кристалла датчика Холла к оси макета вплоть до получения минимальных значений постоянной составляющей B_r . Кроме того, в этой серии определены возможности снижения $B_r/B_{z_{\max}}$ посредством наклона оси одной из катушек по отношению к оси второй катушки. Результаты измерений серии В представлены на рис. 3, 4 и в табл. 2.

Более подробно результаты анализа представлены в разд. 3 и 4.

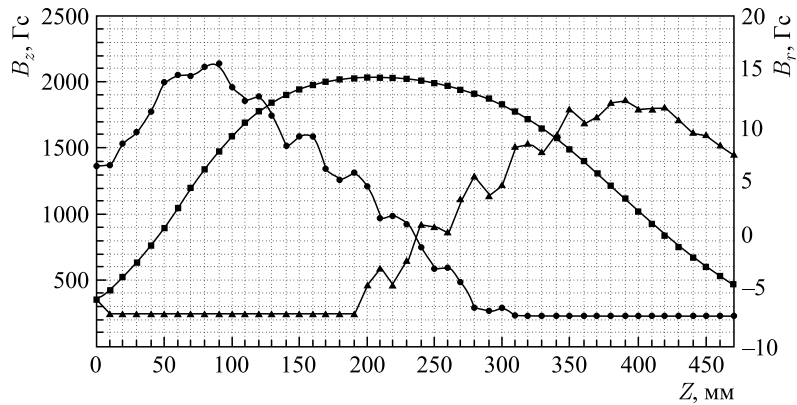


Рис. 3. Распределения компонент магнитного поля вдоль оси системы после регулировки положения датчика Холла: \blacksquare — B_z , \bullet — B_r , \blacktriangle — B_r (при обратном включении тока)

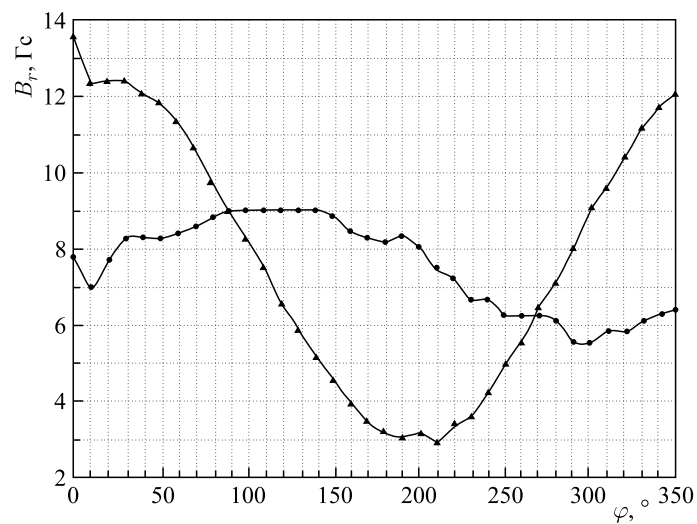


Рис. 4. Азимутальное распределение радиальной компоненты магнитного поля $B_r(\varphi)$ до (кривая 1) и после (кривая 2) изменения наклона катушки

Таблица 2. B_z (при $z = 350$ мм) = 1500 Гс

B_r , Гс	max	min	$\langle B_r \rangle$	ΔB_r	$\Delta B_r / B_z$	$\langle B_r \rangle / B_z$
B_{r1}	13	3	8	± 5	$\pm 3,3 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
B_{r2}	9	5,4	7,2	$\pm 1,8$	$\pm 1,2 \cdot 10^{-3}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$

3. ОЦЕНКА НАКЛОНА ОСИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИЗ-ЗА СПИРАЛЬНОСТИ НАМОТКИ

Для анализа результатов измерений используем следующую модель. Представим катушку в виде набора круговых витков с шагом намотки h , имеющего в каждом слое одинаковый угол наклона витка δ к оси установки. Будем считать, что в соседних слоях наклоны имеют противоположные знаки, благодаря чему суммарный угол наклона оси магнитного поля такой катушки к оси системы β оказывается значительно меньше δ . Эта модель реализуется в случае, когда шаг намотки значительно превосходит поперечный размер витка. Помимо этого, рассмотрение данного раздела применимо к случаю идеальной катушки, ось которой наклонена к оси системы под углом β .

В нашем случае угол наклона витков $\delta = h/(2R) \approx 2,5 \cdot 10^{-2}$. Суммирование по 10 слоям катушки

$$\beta = \frac{h}{2R} - \frac{h}{2R+h} + \frac{h}{2R+2h} - \dots = h \sum_{i=1}^{10} \frac{(-1)^{i+1}}{2R + (i-1)h}$$

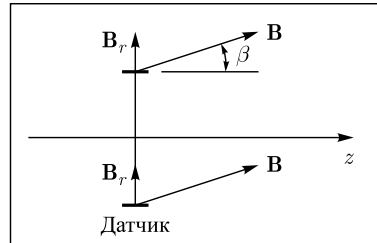
дает величину $\beta \approx 4,5 \cdot 10^{-3}$, или $0,25^\circ$.

4. ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрим несколько вариантов ошибок взаимного положения датчика, штанги и катушек относительно оси макета соленоида, способных повлиять на характер поведения радиальной компоненты B_r .

1) «Идеальный датчик»: ось штанги и плоскость датчика параллельны оси макета (рис. 5),

$$\begin{cases} \Delta B_r = \pm B\beta, \\ \langle B_r \rangle = 0. \end{cases} \quad (1)$$



В этом случае азимутальное распределение $B_r(\varphi)$ должно быть знакопеременным, чего в измерениях не наблюдается.

Рис. 5. Эпюры компонент поля при «идеальном датчике»

2) Наклон самого датчика Холла γ .

а) Штанга и магнитное поле параллельны оси (рис. 6),

$$\begin{cases} \Delta B_r = 0, \\ B_r = \langle B_r \rangle = B\gamma. \end{cases} \quad (2)$$

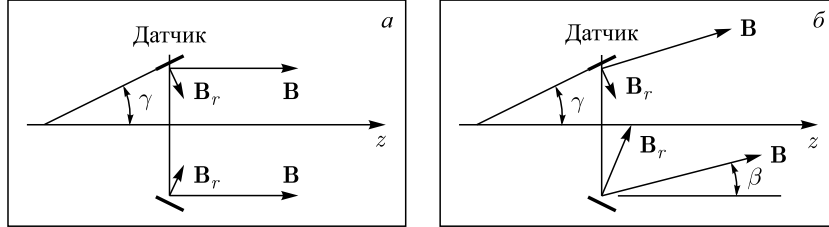


Рис. 6. Эпюры компонент поля в случае а) когда штанга и магнитное поле параллельны оси; б) когда штанга параллельна оси, а магнитное поле «наклонено»

В этом случае датчик показывает слабо зависящую от радиуса B_r -компоненту магнитного поля: $B_r = \langle B_r \rangle$.

б) Штанга параллельна оси, магнитное поле имеет наклон,

$$\begin{cases} \Delta B_r = \pm B \beta, \\ \langle B_r \rangle = B \gamma. \end{cases} \quad (3)$$

В этом случае $\Delta B_r/B \approx \pm \beta \approx \pm 4,5 \cdot 10^{-3}$, что неплохо согласуется с результатами измерений: $\Delta B_r/B \approx \pm 3,5 \cdot 10^{-3}$ (серия А) и $\pm 3,3 \cdot 10^{-3}$ (серия В без изменения наклона катушки).

Оценка угла наклона плоскости датчика к штанге из результатов измерений дает $\gamma = \langle B_r \rangle/B \approx 7,3 \cdot 10^{-3} \approx 0,4^\circ$ для серии А и $\approx 5,3 \cdot 10^{-3} \approx 0,3^\circ$ для серии В. Здесь приведены минимальные значения $\langle B_r \rangle/B$ из табл. 1 и 2. Отметим, что если $\beta > \gamma$, то распределение $B_r(\varphi)$ должно быть знакопеременным, чего в измерениях тоже не наблюдается.

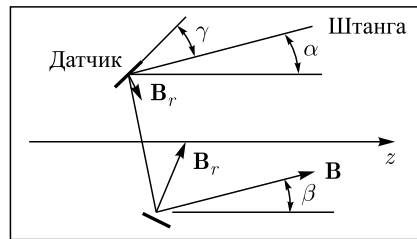


Рис. 7. Эпюры компонент поля в случае, когда и штанга, и датчик имеют наклон

3) Наклон штанги на угол α и датчика на угол γ ,

$$\begin{cases} \Delta B_r = \pm B (\beta - \alpha), \\ \langle B_r \rangle = B \gamma. \end{cases} \quad (4)$$

Оценка угла наклона штанги к оси установки: $\alpha \approx \beta - \Delta B_r/B \approx (4,5 - 3,3) \cdot 10^{-3} \approx 1,2 \cdot 10^{-3} < 0,1^\circ$.

Изменением угла наклона плоскости катушки, вблизи центра которой проводились измерения серии В, удалось уменьшить $\Delta B_r/B$ до величины $1,2 \cdot 10^{-3}$. Благодаря регулировке ДХг уменьшены также значения $\langle B_r \rangle/B$: $(4,8 - 5,3) \cdot 10^{-3}$ по сравнению с $7,3 \cdot 10^{-3}$.

Выводы к разделам 2–4. Из анализа рассмотренных вариантов представляется, что в измерениях, по всей видимости, реализован случай 2б, т. е.

- ось штанги совпадает с осью макета соленоида;
- плоскость ДХг, измеряющего радиальную компоненту, имеет небольшой угол наклона к оси γ , что дает постоянную составляющую $\langle B_r \rangle / B \approx \gamma \approx (5-7) \cdot 10^{-3}$, т. е. это чисто *измерительный эффект*;
- азимутальная неоднородность магнитного поля $\Delta B_r / B \approx \pm 3 \cdot 10^{-3}$ объясняется углом наклона оси магнитного поля $\beta \approx 3 \cdot 10^{-3}$.

Изменение наклона одной из катушек позволило уменьшить гармонику $\Delta B_r / B$, но не изменило постоянную составляющую $\langle B_r \rangle / B$.

Регулировка наклона ДХг позволила уменьшить $\langle B_r \rangle / B$, но не повлияла на величину гармоники $\Delta B_r / B$. Таким образом, установлено, что результаты измерений находятся в хорошем согласии с формулами (3), (4).

Следует отметить, что эти выводы основываются на результатах измерений, полученных в двух точках по оси макета ($z = 140$ и $z = 350$ мм), находящихся в сходных условиях: равно удалены от торцов макета, расположены на спадах распределения $B_z(z)$, вблизи экстремумов B_r .

5. РАСЧЕТ ПОЛЕЙ СПИРАЛЬНОЙ КАТУШКИ

Следуя [7], рассмотрим модель спиральной катушки, которая наиболее близка к геометрии катушек фокусирующего соленоида первой ускоряющей секции.

Пусть имеется катушка длиной $2c$, намотанная спиралью с постоянным шагом h на цилиндре радиуса a и состоящая из N полных витков (рис. 8).

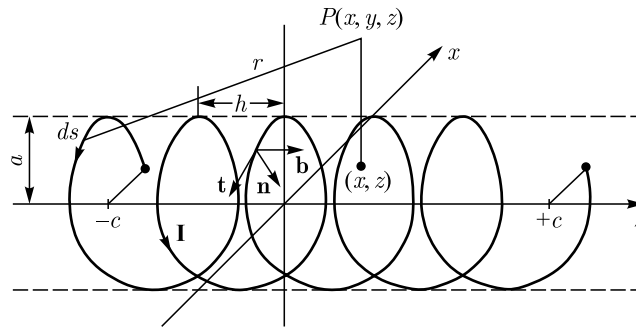


Рис. 8. К описанию спиралевидной катушки в цилиндрической системе координат

На интервале между точками $z = -c$ и $z = c$ уравнение спирали можно записать в виде

$$\begin{aligned}\rho' &= a, \\ \varphi' &= \frac{2\pi z'}{h} = \operatorname{ctg} \psi \cdot \frac{z'}{a}.\end{aligned}$$

Кроме того, при заданном значении шага спирали h

$$Nh = 2c.$$

Пусть

$$r^2 = (z - z')^2 + \rho^2 + a^2 - 2a\rho \cos(\varphi - \varphi')$$

означает квадрат расстояния между точкой наблюдения (ρ, φ, z) и любой точкой (a, φ', z') спирали. Тогда, используя уравнение $\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}$ или

$$\begin{aligned}B_\rho &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial A_\varphi}{\partial z}, \\ B_\varphi &= \frac{\partial A_\rho}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial \rho}, \\ B_z &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho}(\rho A_\varphi) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_\rho}{\partial \varphi}\end{aligned}$$

и выражение для векторного потенциала $\mathbf{A}(\rho, \varphi, z)$

$$\mathbf{A}(\rho, \varphi, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{i(\rho', \varphi', z')}{r(\rho, \varphi, z, \rho', \varphi', z')} dV,$$

можно получить выражения для всех компонент магнитного поля спиралевидной катушки в следующем виде:

$$\begin{aligned}B_z &= \frac{I \operatorname{ctg} \psi}{4\pi} \int_{-c}^c \frac{a - \rho \cos((2\pi z'/h) - \varphi)}{r^3} dz', \\ B_\rho &= \frac{I \operatorname{ctg} \psi}{4\pi} \int_{-c}^c \frac{(z - t) \cos((2\pi z'/h) - \varphi) + a \sin((2\pi z'/h) - \varphi)}{r^3} dz', \\ B_\varphi &= \frac{I \operatorname{ctg} \psi}{4\pi} \int_{-c}^c \frac{\rho + (z - t) \sin((2\pi z'/h) - \varphi) - a \cos((2\pi z'/h) - \varphi)}{r^3} dz' .\end{aligned}$$

Последние формулы были использованы для оценки величин компонент поля при параметрах катушки, соответствующих параметрам катушек, изготовленных для ЛУЭ-200.

Ниже приведены аксиальные зависимости компонент поля при угле наблюдения $\varphi = 0$ и радиусах наблюдения $\rho = 0$ и $\rho = 2$ мм (рис. 9).

На рис. 10 показаны графики азимутальной зависимости компонент поля на радиусах наблюдения $\rho = 0$ и $\rho = 2$ мм при $z = -10$ см.

Из проведенных расчетов следует, что даже на оси спиральной катушки ($\rho = 0$ см) азимутальная и радиальная компоненты поля отличны от нуля. Относительный размах $\Delta B_\rho/B_z$ и $\Delta B_\varphi/B_z$ на краю катушки ($z \approx -10$ см) составляет величину $\pm 16/1700 \approx \pm 0,01$ (рис. 10, а). Причем этот размах имеет место и в «азимутальных распределениях» в центре катушки ($\rho = z = 0$). При увеличении радиуса наблюдения от 0 до 2 мм в азимутальных рас-

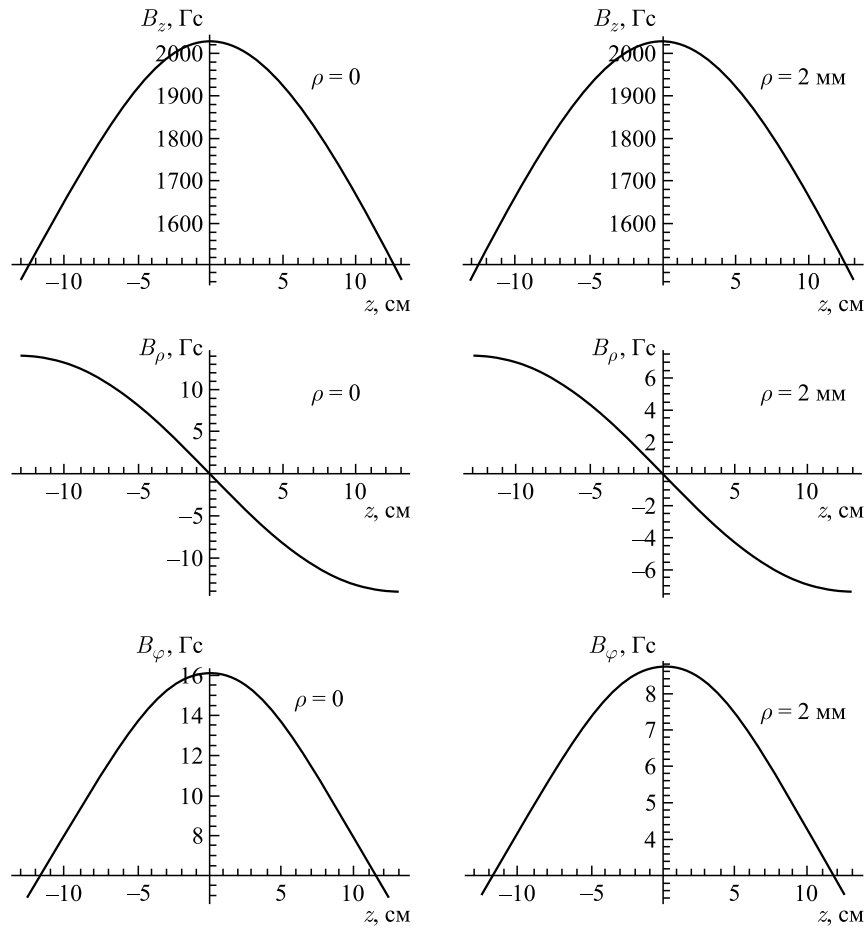


Рис. 9. Аксиальные зависимости компонент поля спиральной катушки

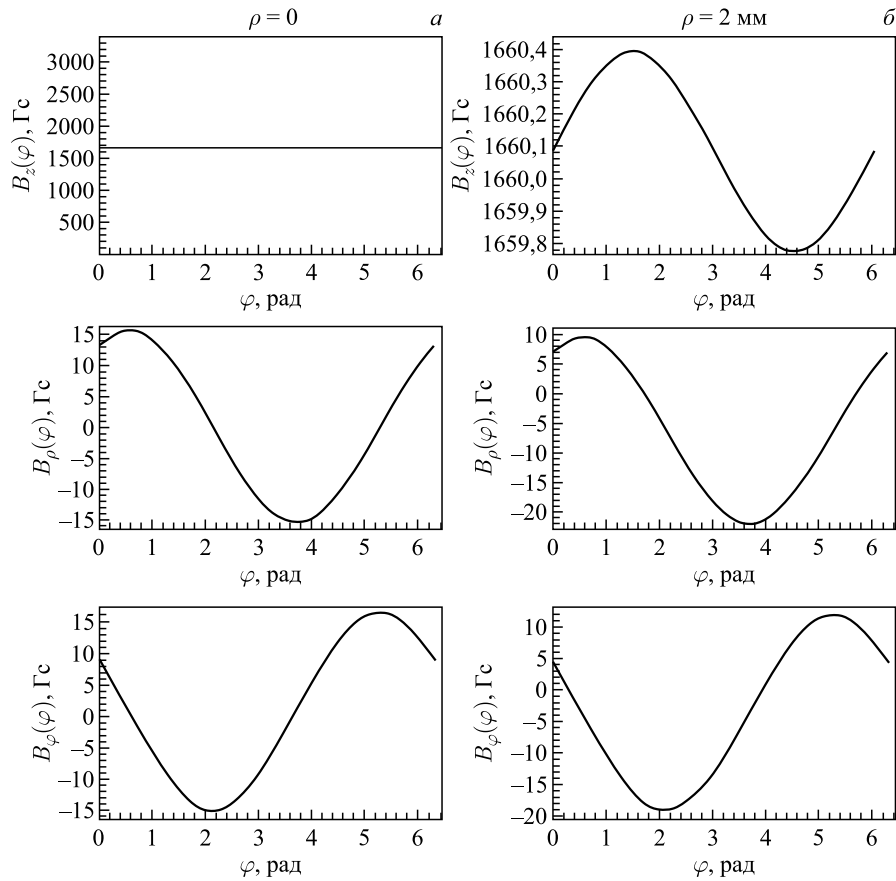


Рис. 10. Азимутальные зависимости компонент поля спиральной катушки, $\varphi = 0-2\pi$

пределах появляется постоянная составляющая в B_ρ и $B_\varphi \approx 0,003B_z$ (рис. 10). Максимальные значения B_ρ на оси вблизи края катушки составляют те же ± 16 Гс при B_z в центре 2000 Гс (рис. 9), что хорошо согласуется с измеренными значениями (рис. 4). В то же время модуляция с шагом $\sim 2h$ в аксиальных распределениях $B_\rho(z)$ отсутствует, что неудивительно, так как $h \ll a$. По-видимому, это — эффект измерительной системы.

Заметим, что пространственная конфигурация магнитного поля спиральной катушки имеет сложную форму. Для иллюстрации на рис. 11 приведены азимутальные распределения радиальной компоненты магнитного поля для двух значений радиуса вблизи медианной плоскости катушки и на ее краях.

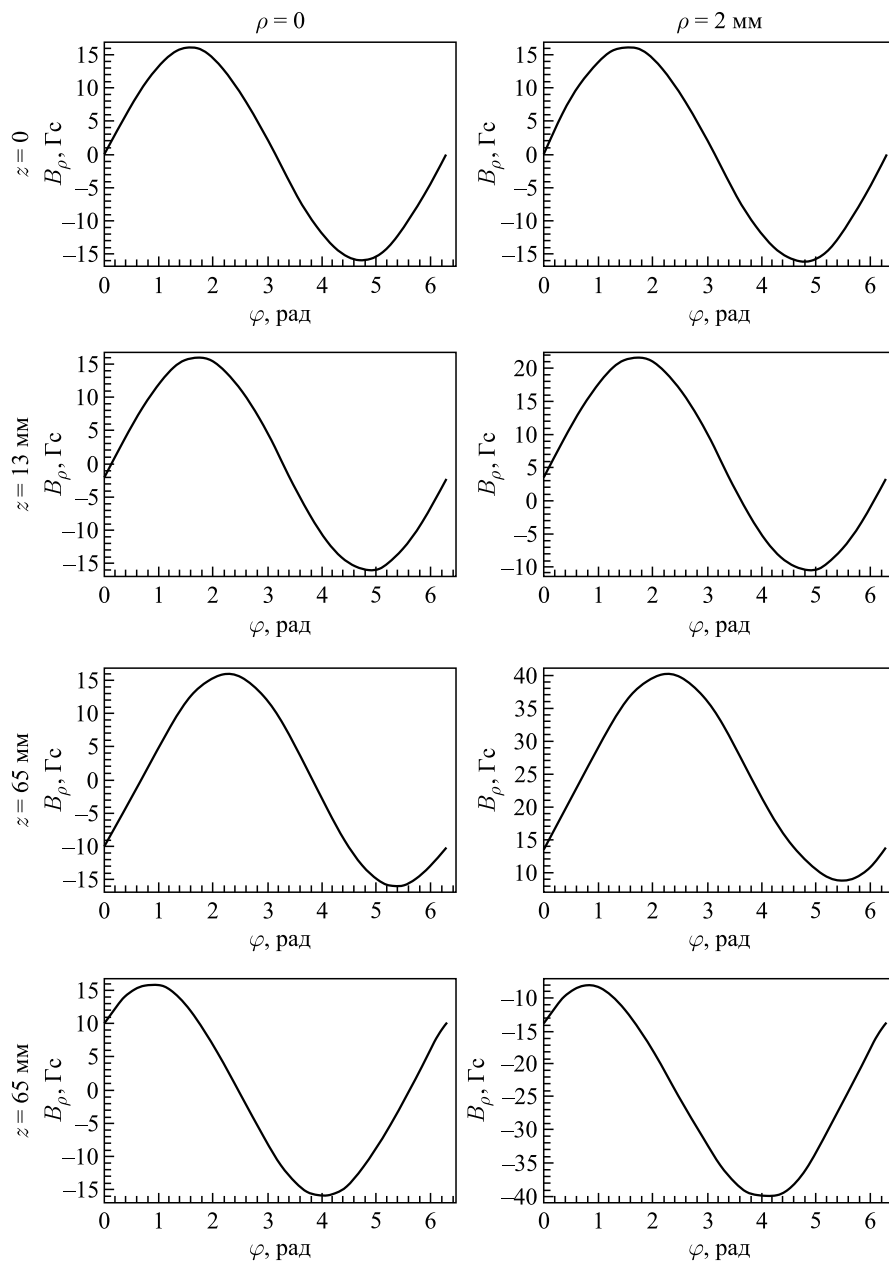


Рис. 11. Распределения $B_\rho(\varphi)$, $\varphi = 0-2\pi$

6. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКА

Моделирование ускорения и транспортировки пучка электронов в ЛУЭ-200 проводилось с помощью программы PARMELA [8] для оптимизированной расстановки и оптимизированных в [3] параметров элементов ускоряющей системы, параметров системы магнитной фокусировки ускорителя от источника электронов до конца ускоряющей структуры и параметров канала транспортировки пучка от выхода ускоряющей структуры до мишени.

Использовались три типа распределений магнитного поля вдоль ускорительного тракта, приближенных к возможным вариантам распределений магнитного поля, полученным на ускорителе:

- Тип 1 — единый соленоид состоит из 16 стандартных катушек с оптимизацией участка «катод–группирователь» (рис. 12), без реверса.
- Тип 2 — распределение, предложенное в физобосновании [1] (с реверсом магнитного поля) с уменьшенными до 2 кГс максимальными значениями полей в соленоидах 1 и 2, рис. 13).

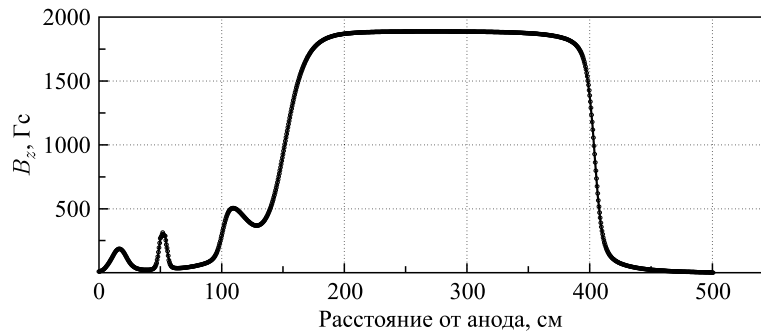


Рис. 12. Распределение магнитного поля типа 1

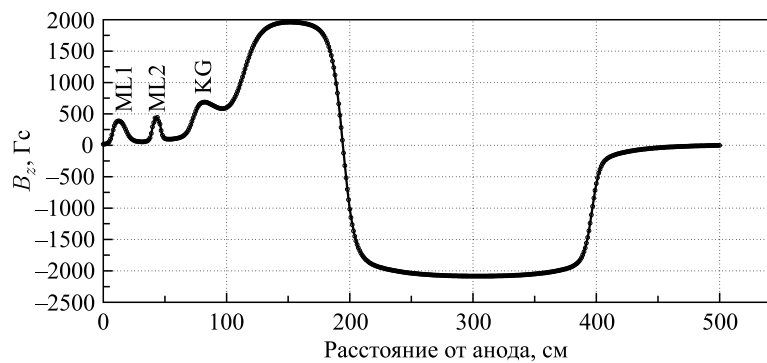


Рис. 13. Распределение магнитного поля типа 2

- Тип 3 — отличается от типа 1 тем, что соленоид разбит на две группы по 8 катушек, имеющие встречные токи (т. е. тоже реверс).

Считалось, что имеется общий угол β между осью секции и осью магнитного поля (рис. 14). Использовались три значения β : $0,3 \cdot 10^{-3}$ и $1,5 \cdot 10^{-3}$. Начальные параметры пучка — стандартные [3], ток пучка 3 А.

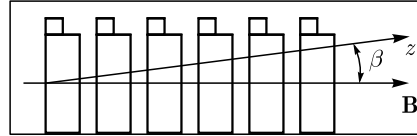


Рис. 14. Схема задания общего угла между осью секции и осью магнитного поля

Ниже приведены траектории электронов пучка в ускорителе и канале транспортировки, а также форма пятна пучка на мишени для различных значений β . Все линейные размеры представлены в сантиметрах.

Моделирование для магнитного поля типов 1 и 2 при $\beta = 0$ показало, что, несмотря на различное поведение огибающих (рис. 15 и рис. 16), токопрохождение и размер пятна на мишени практически совпадают (рис. 17).

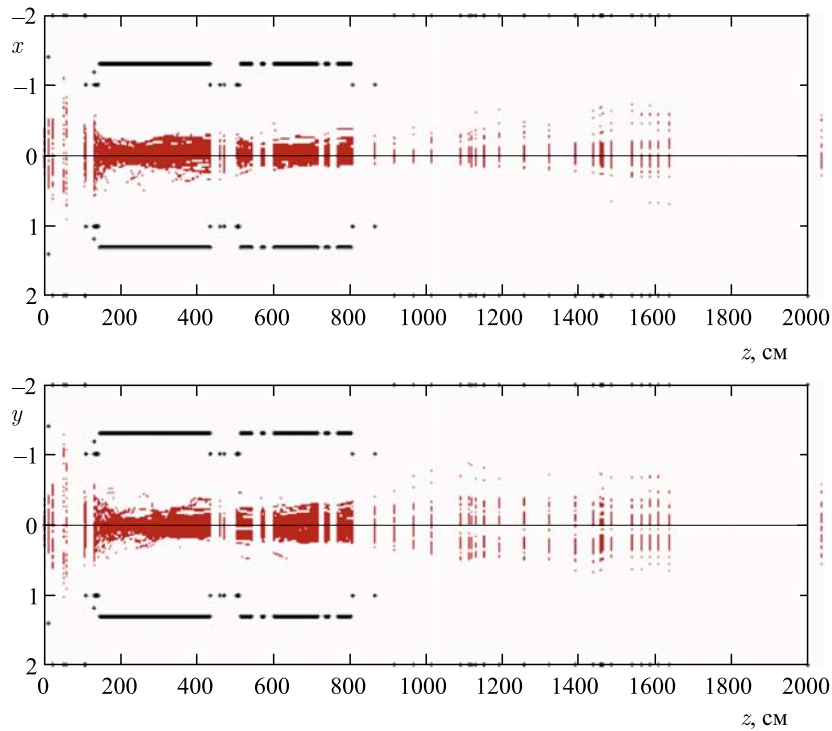


Рис. 15. Траектории электронов пучка для $\beta = 0$ и магнитного поля типа 1

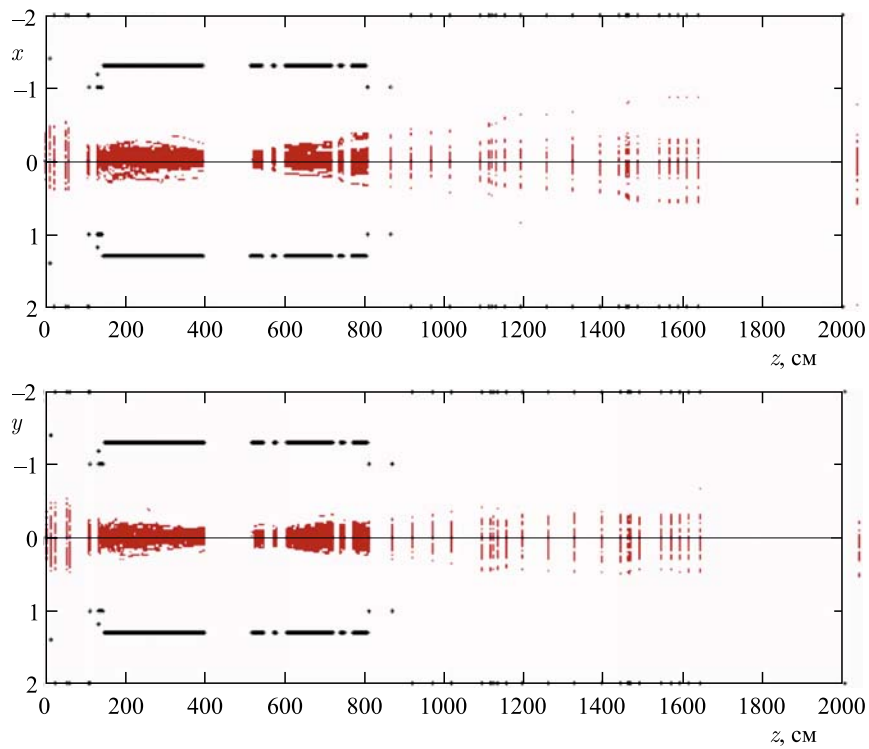


Рис. 16. Траектории электронов пучка для $\beta = 0$ и магнитного поля типа 2

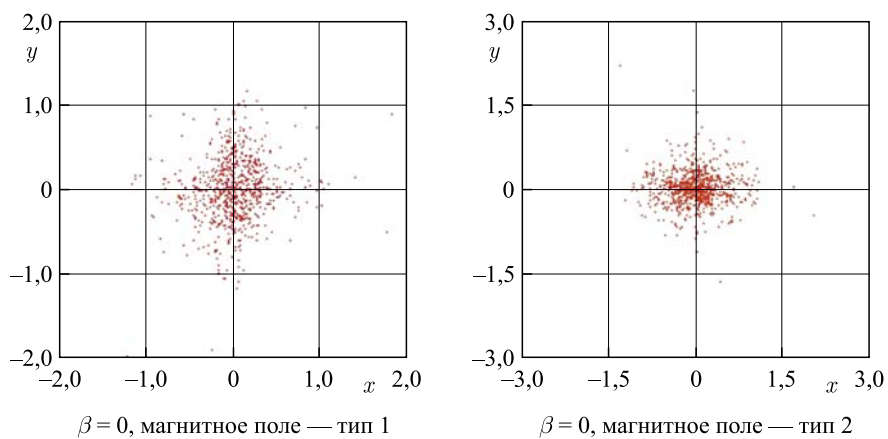


Рис. 17. Пятно пучка на мишени для двух типов магнитного поля соленоида. Токо-прохождение в обоих случаях 77,5% (т.е. 775 частиц на мишени из 1000 частиц из пушки)

В то же время попытка устроить «реверс» магнитного поля, запитав вторую группу из 8 катушек встречным током, дала несколько неожиданный результат. Поведение огибающей существенно изменилось (рис. 18–21, 24). Начиная с группирователя, токопрохождение даже при $\beta = 0$ уменьшилось до $\sim 60\%$. По-видимому, при работе с таким полем требуется более тщательная подстройка распределения магнитного поля в промежутке анод–ускоряющая секция.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов моделирования, представленных на рис. 15–25, позволяет сделать следующие выводы:

1. Систематическая ошибка в установке катушек соленоида с углом магнитного поля β , например, в горизонтальной плоскости OX , из-за дрейфа в скрещенных полях вызывает появление смещения и угла у пучка не только в этой плоскости, но и в перпендикулярной плоскости. Это приводит для

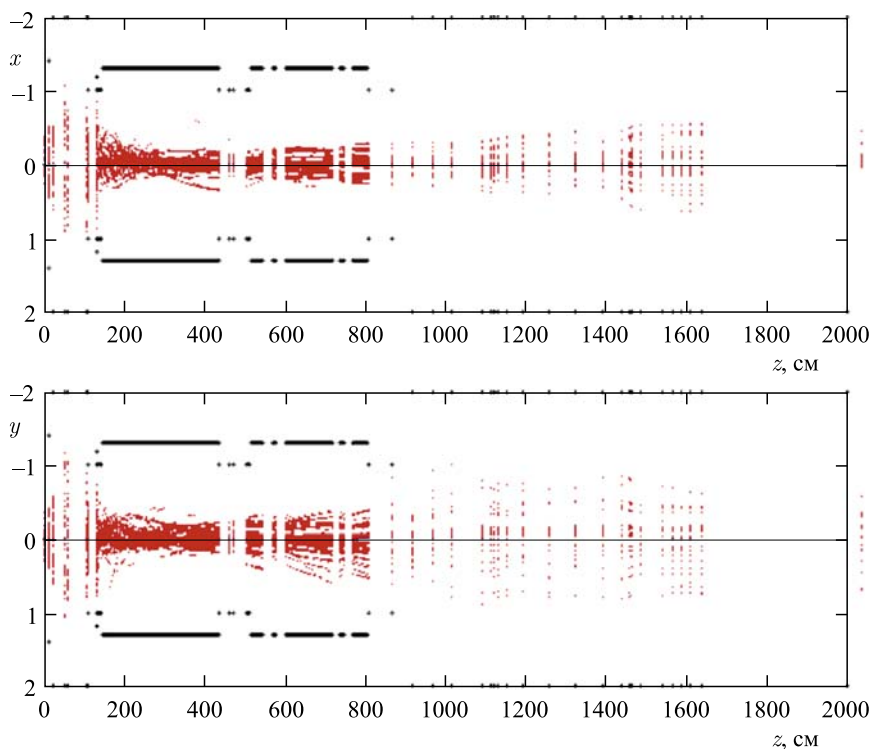


Рис. 18. Траектории электронов пучка для $\beta = 0$ и магнитного поля типа 3

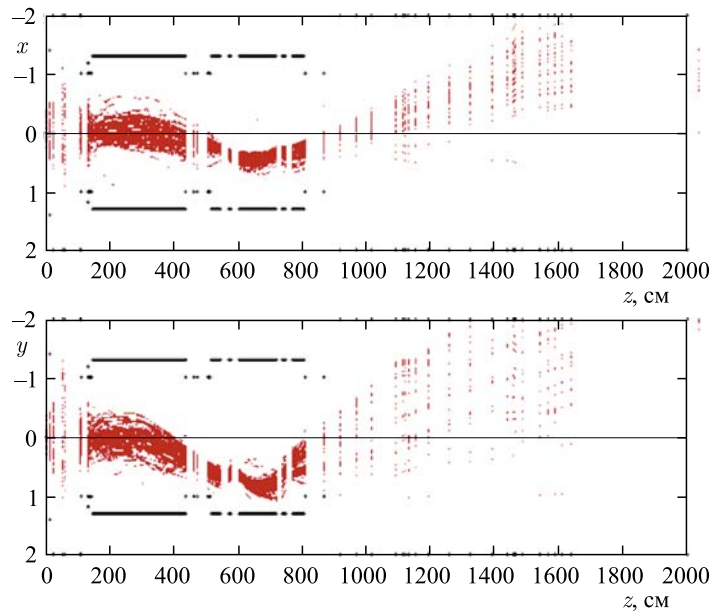


Рис. 19. Траектории электронов пучка для $\beta = 3 \cdot 10^{-3}$ и магнитного поля типа 1

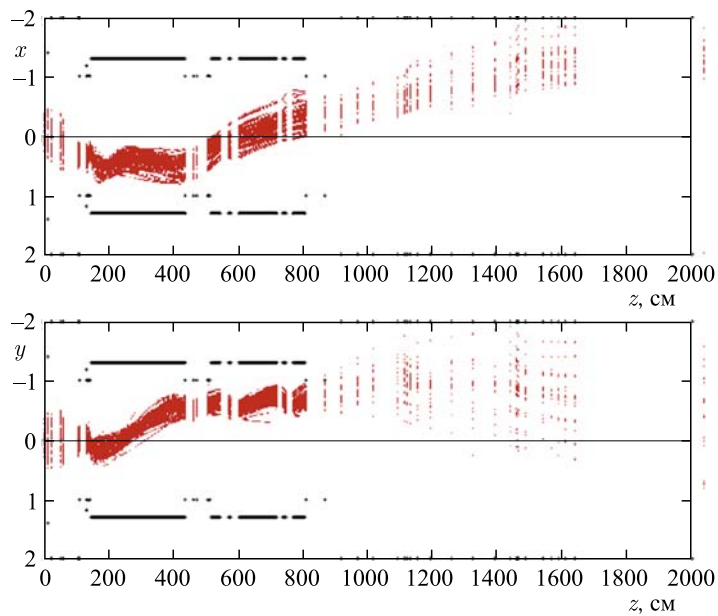


Рис. 20. Траектории электронов пучка для $\beta = 3 \cdot 10^{-3}$ и магнитного поля типа 2

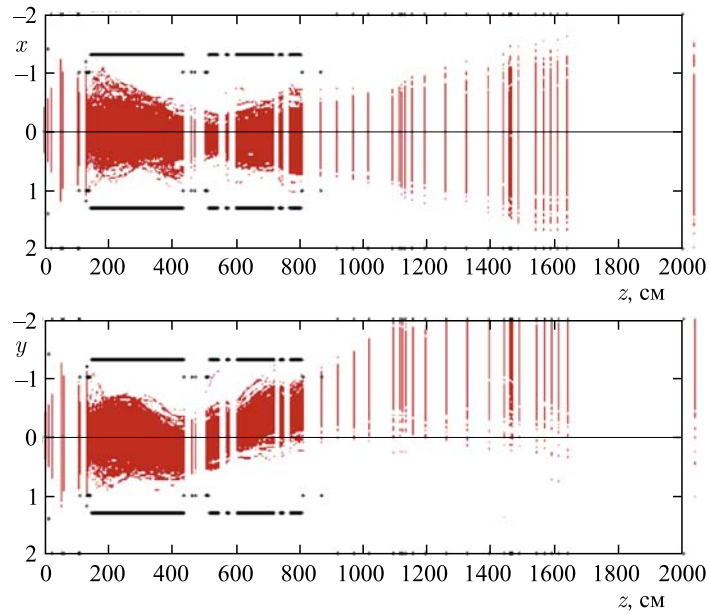


Рис. 21. Траектории электронов пучка для $\beta = 3 \cdot 10^{-3}$ и магнитного поля типа 3

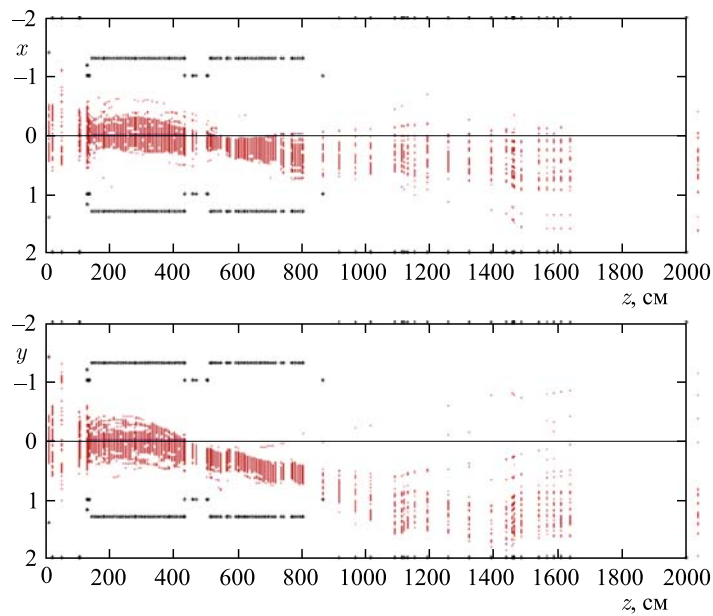


Рис. 22. Траектории электронов пучка для $\beta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ и магнитного поля типа 1

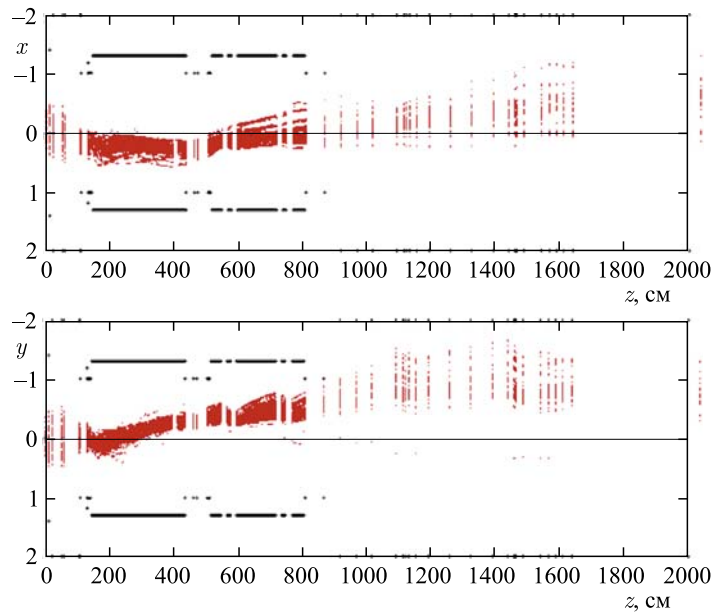


Рис. 23. Траектории электронов пучка для $\beta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ и магнитного поля типа 2

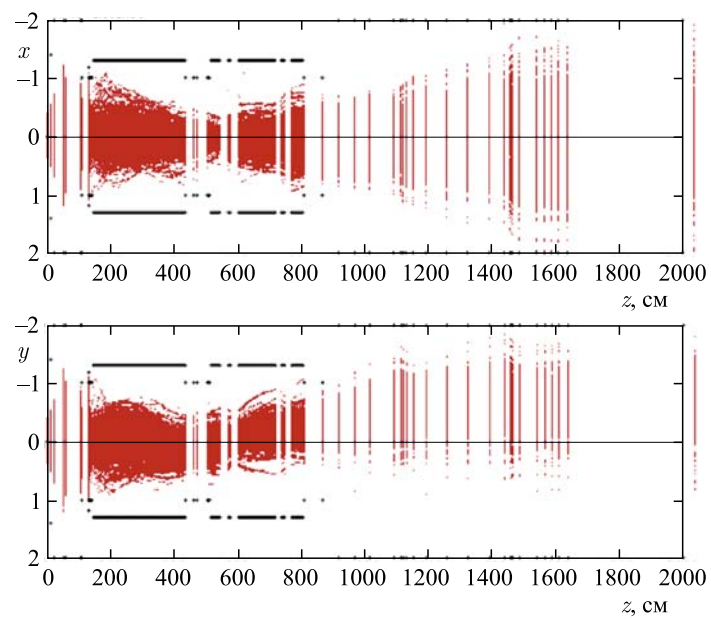


Рис. 24. Траектории электронов пучка для $\beta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ и магнитного поля типа 3

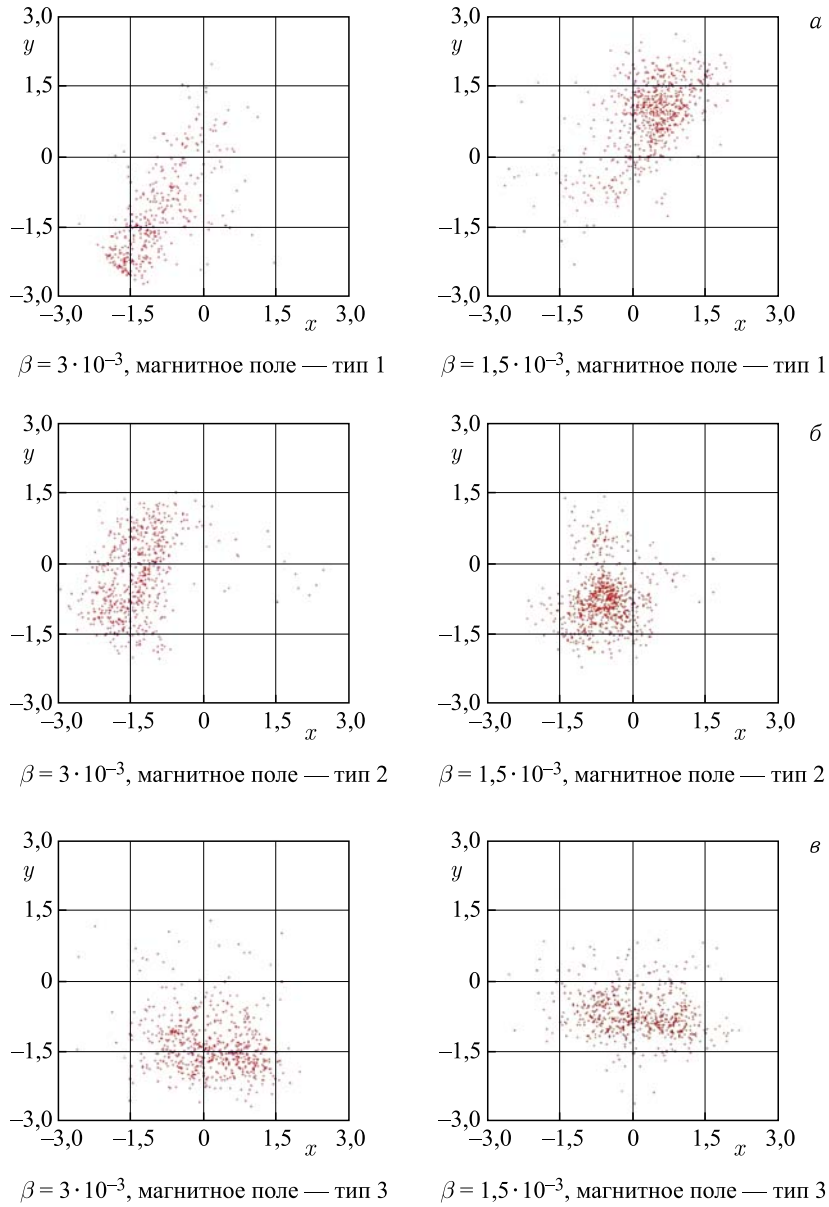


Рис. 25. Пятно пучка на мишени: a – $б$) $\beta = 3 \cdot 10^{-3}$ (слева), $\beta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ (справа)

поля типа 1 и $\beta = 3 \cdot 10^{-3}$ к уменьшению токопрохождения до уровня $< 40\%$, размытию пятна и смещению его центра в плоскости мишени $\sim -1,5$ см.

2. Для поля того же типа при меньшем угле $\beta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ токопрохождение увеличивается до 70% , смещение уменьшается примерно вдвое, но имеет противоположный знак.

3. Для поля типа 2 соответствующие результаты более оптимистичны: токопрохождение $\sim 60\%$, смещения: 0 по x и $\sim -1,5$ см по y для $\beta = 3 \cdot 10^{-3}$ и 75% , $-0,75$ см по x и y для $\beta = 1,5 \cdot 10^{-3}$ соответственно.

При $\beta = 0$, несмотря на различное поведение огибающих для распределения магнитных полей типа 1 и типа 2, токопрохождение и размер пятна на мишени практически совпадают, что подтверждает отсутствие необходимости организации реверса поля у соленоидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Novokhatsky A. V. et al.* Linear Accelerator for Intense Resonance Neutron Source (IREN) // Proc. of the 2nd Workshop on JINR Tau-Charm Factory. D1-9-13-459, Dubna, 1994. P. 197.
2. *Кобец В. В. и др.* Проект ИРЕН: Статус и первые результаты // IV научный семинар памяти В. П. Саранцева. Труды. Дубна: ОИЯИ, 2002. С. 150.
3. *Александров В. С. и др.* Расчет динамики пучка электронов ускорителя ЛУЭ-200 // Письма в ЭЧАЯ. 2004. № 3[120]. С. 70.
4. *Сумбаев А. П., Кукарников С. И.* Фокусирующий соленоид первой ускоряющей секции ускорителя ЛУЭ-200. Сообщение ОИЯИ Р9-2016-48. Дубна, 2016. В печати.
5. *Калмыков А. В. и др.* Стенд для моделирования и испытания магнитных элементов системы фокусировки и транспортировки пучка ускорителя ЛУЭ-200 установки ИРЕН. Сообщение ОИЯИ Р9-2011-49. Дубна, 2011.
6. *Makeyev V. K.* Hall Three-Channels Magnetometer (H3M) // Proc. of the 9th Intern. Magnet Measurement Workshop (IMM-9). CEA, Saclay, France, 1995.
7. *Бухгольц Г.* Расчет электрических и магнитных полей. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. С. 351–359.
8. *Mouton B.* The PARMELA Program. LAL/SERA 93-455. Orsay, 1993.

Получено 4 июля 2016 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 12.10.2016.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,44. Уч.-изд. л. 1,74. Тираж 180 экз. Заказ № 58920.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/