

УДК 539.1.08

ПРОТОТИП КОМПЕНСАТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В. И. Алексеев, В. А. Басков, Л. А. Горбов, В. А. Дронов, А. И. Львов,
А. В. Кольцов, В. В. Полянский, С. С. Сидорин, Е. А. Хафизова

Представлена конструкция прототипа компенсатора магнитного поля, предназначенного для исключения влияния краевого магнитного поля магнита ускорителя С-25Р “Пахра” Физического института им. П. Н. Лебедева РАН на электронный пучок при его выводе. Результаты исследования показали, что конструкция способна уменьшить внешнее магнитное поле $B_0 \sim 0.1$ Тл до нулевых значений магнитного поля внутри конструкции прототипа.

Ключевые слова: ускоритель, электронный пучок, магнитное поле, отожженное железо.

На ускорителе С-25Р “Пахра” Физического института им. П. Н. Лебедева РАН создан канал медленного вывода электронов из ускорителя [1, 2] (рис. 1). Основными преимуществами выведенного электронного пучка по сравнению с вторичными электронными пучками являются низкофоновые условия работы экспериментальных установок, лучшее энергетическое разрешение и, при необходимости, высокие интенсивности электронного пучка [2–4].

Выведенный электронный пучок формируется системой медленного вывода и протяженным магнитооптическим каналом (МОК). Электронный пучок через выходное окно ускорителя (алюминиевую пластину толщиной 0.2 мм) (1) и воздушный промежуток длиной ~ 0.7 м вводится в тракт МОК (рис. 1). Электронный тракт МОК вакуумирован, диаметр тракта в местах нахождения линз составляет 38 мм, а в межлинзовых промежутках 80 мм. Общая длина тракта от выходного окна ускорителя в ускорительном зале до магнита СП-57 в зале № 1 составляет ~ 25 м. Канал включает 4 линзы, один поворотный магнит СП-3 в зале ускорителя с размером полюса 500×200 мм² и межполюсным расстоянием 50 мм. Нужный угол поворота пучка 18.5° достигается при индукции поля магнита $B_{\text{сп-3}} \approx 0.6$ Тл для электронов с энергией $E_0 = 350$ МэВ.

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: baskov@x4u.lebedev.ru.

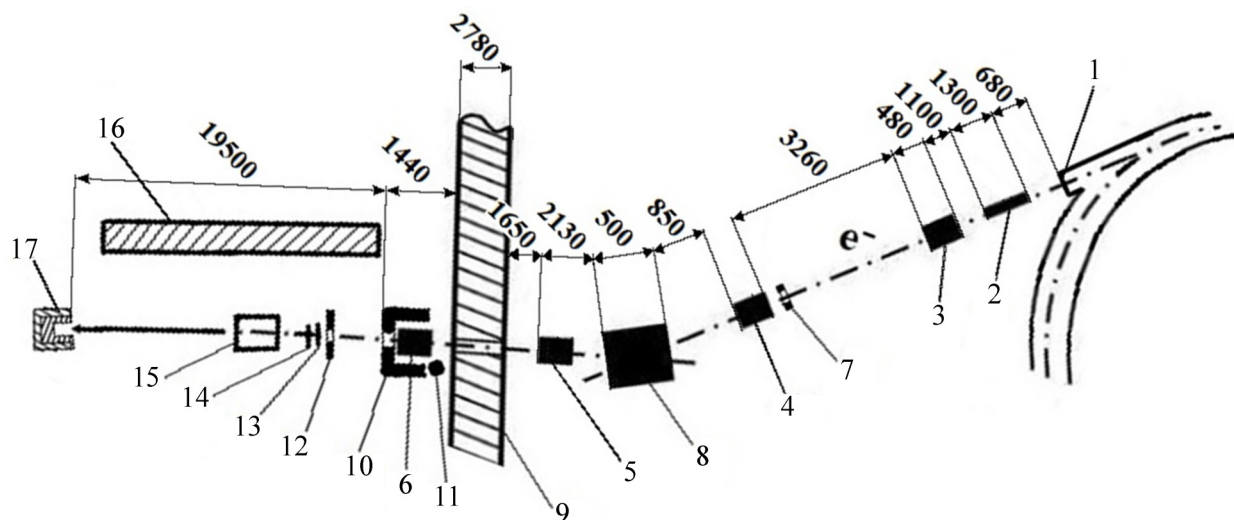


Рис. 1: Схема канала медленного вывода ускорителя С-25Р "Пахра": 1 – выходной фланец ускорительной камеры; 2 – компенсатор краевого магнитного поля (КМП); 3–6 – квадрупольные линзы магнитооптического канала (Л1–Л4); 7 – внутриканальный коллиматор (К₁); 8 – поворотный магнит СП-3 (М); 9 – свинцово-бетонная стенка ускорительного зала; 10 – свинцовая антифоновая защита с рабочим коллиматором (К₂); 11 – монитор "растяжки"; 12 – сцинтилляционный счетчик антисовпадений (А); 13 и 14 – сцинтилляционные триггерные счетчики (S₁ и S₂); 15 – тестируемый детектор (D); 16 – бетонный блок; 17 – поглотитель электронного пучка ("могильник").

Одним из ключевых элементов канала является компенсатор магнитного поля (КМП) (2) – устройство, предназначенное для исключения влияния краевого магнитного поля магнита ускорителя на электронный пучок при его выводе. После выхода из ускорителя пучок проходит 68 см вблизи полюса магнита ускорителя, краевое переменное поле которого ($B_{\max} \sim 0.4$ Тл) сильно "растягивает" пучок в горизонтальной плоскости. При попадании пучка в КМП влияние поля прекращается, и он без искажений транспортируется к первой линзе и далее в экспериментальный зал № 1. КМП входит в состав вакуумного канала как его первый элемент (рис. 2).

При создании КМП были проведены исследования различных конструкций с целью выбора наилучшей, при которой соотношение значения индукции магнитного поля внутри канала КМП, по которому должны проходить электроны, к значению вне канала должны быть минимальным, чтобы влияние магнитного поля на электронный пучок было также минимальным. В ходе исследований была выбрана конструкция прототипа

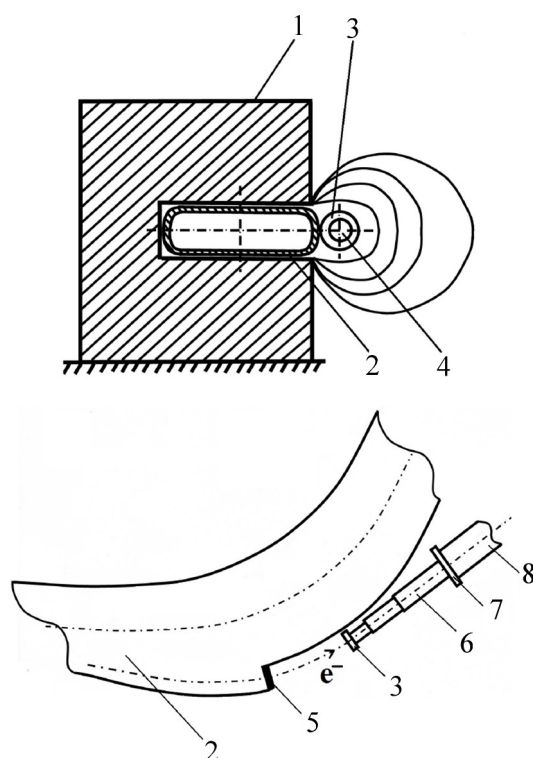


Рис. 2: Схема расположения КМП относительно ускоряющего магнита и вакуумной камеры ускорителя: 1 — ускоряющий магнит; 2 — вакуумная камера; 3 — входной фланец КМП; 4 — вход в КМП; 5 — выходной фланец ускорительной камеры; 6 — КМП; 7 — выходной фланец КМП; 8 — вакуумная труба магнитооптического канала.

КМП, определены её основные характеристики. В дальнейшем, на основе прототипа был создан основной КМП, который успешно эксплуатируется в работе электронного тракта МОК в ключевой точке прохождения электронного пучка вблизи ускорительного магнита (рис. 3(а)).

За основу конструкции прототипа КМП взята простая конструкция защитного экрана из отожженного пермаллоя, применяемая для защиты ФЭУ от слабых магнитных полей (до $\sim 0.01\text{--}0.03$ Тл) в некоторых конструкциях детекторов [5]. Прототип КМП является сборкой из трех цилиндров длиной 150 мм (рис. 3(б)). Внутренним первым цилиндром являлся цилиндр из отожженного мягкого железа внешним диаметром 30 мм и толщиной 0.5 мм. Вторым цилиндром являлся цилиндр из нержавеющей стали с внутренним диаметром 31 мм и толщиной стенки 0.5 мм. Третьим цилиндром являлся цилиндр из пластмассы с внутренним диаметром 33 и толщиной стенки 2 мм. На внешнюю сторону пластмассового цилиндра слой за слоем плотно намотана проволока

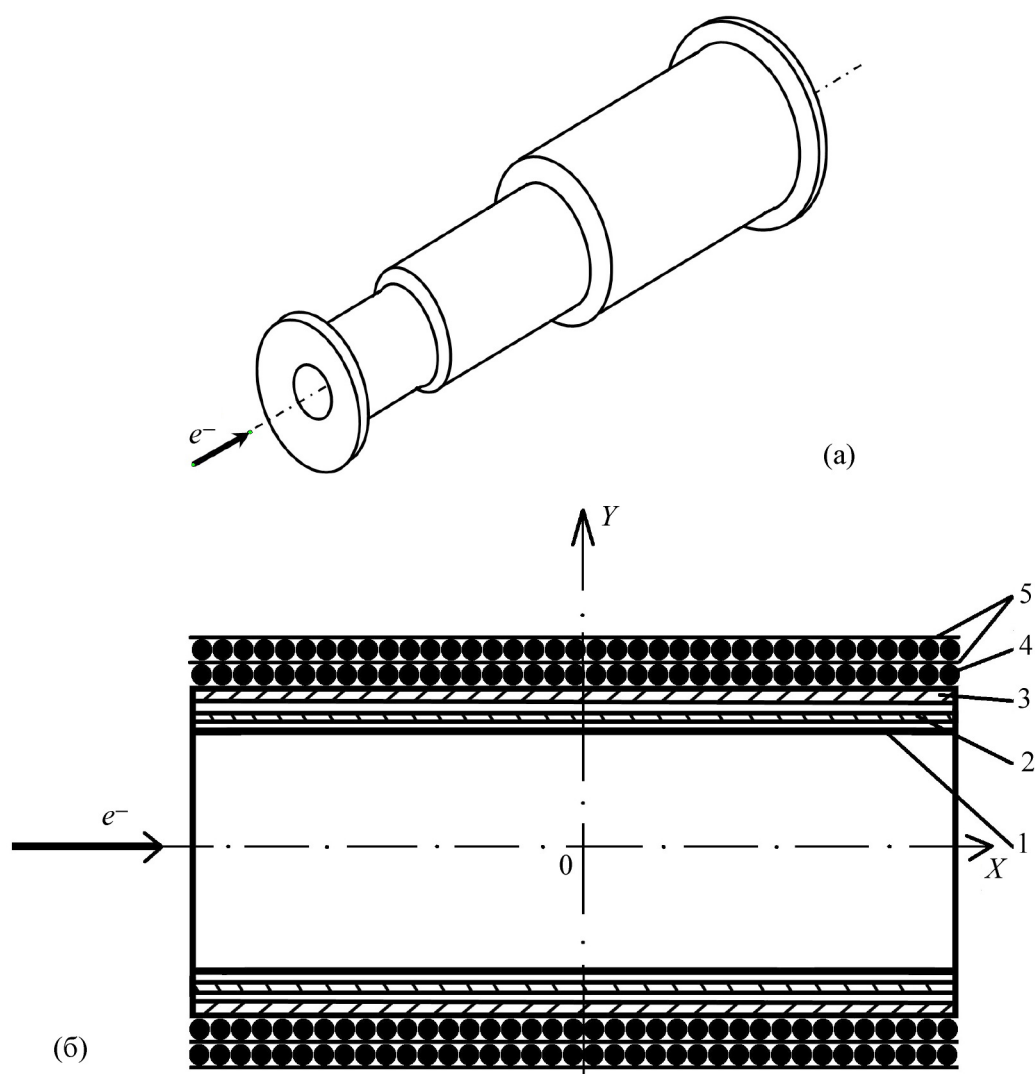


Рис. 3: Схема компенсатора магнитного поля (КМП): (а) общий вид рабочего КМП; (б) схема прототипа КМП (1 – цилиндр из отожженного мягкого железа; 2 – цилиндр из нержавеющей стали; 3 – цилиндр из пластмассы; 4 – слой проволоки или обмотки из мягкого отожженного железа; 5 – тефлоновые прокладки).

из мягкого отожженного железа диаметром 0.3 мм. При намотке проволока не разрывалась, после окончания одного слоя начинался новый. Слои друг от друга отделены тефлоновой пленкой толщиной 0.03 мм и шириной, равной ширине цилиндра.

Исследование влияния внешнего магнитного поля на параметры поля внутри прототипа КМП происходило с использованием электромагнита СП-57 в экспериментальном зале № 1 ускорителя “Пахра”. Размер полюсов магнита составлял $700 \times 1100 \text{ мм}^2$

с межполюсным промежутком 100 мм. При исследовании прототип КМП помещался в центре межполюсного промежутка СП-57 и надежно закреплялся для исключения сдвижки прототипа при возникновении магнитного поля в случае подачи тока в обмотки магнита, а также для нахождения прототипа в области постоянного поля магнита СП-57 вне краевых эффектов.

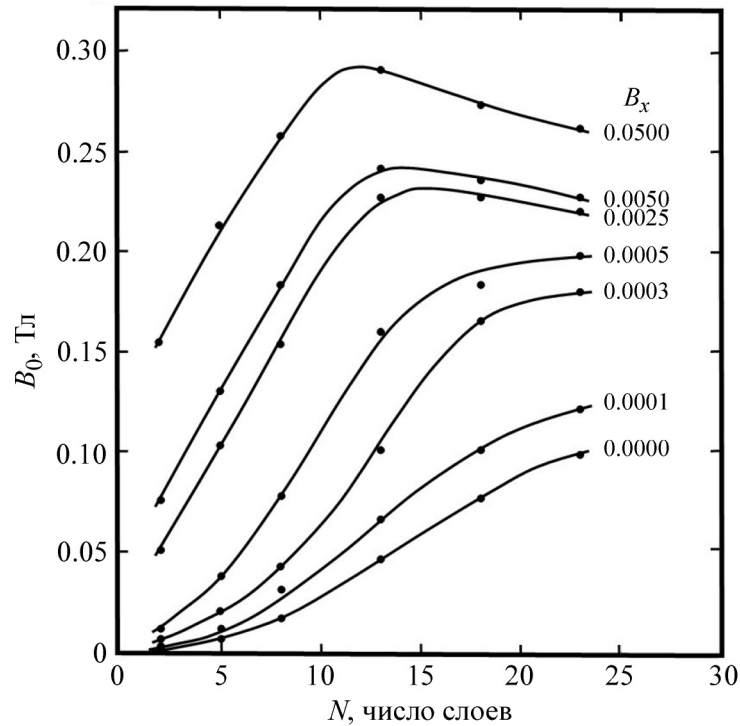


Рис. 4: Соотношение между величиной внешнего поля (B_0), приложенного к прототипу КМП, и числа слоев обмотки (N), при которых можно получить заданную величину магнитного поля внутри прототипа (B_x [Тл]).

На рис. 4 представлено соответствие между величиной внешнего магнитного поля (B_0), приложенного к прототипу, и величиной поля внутри прототипа (B_x), а также числом слоев обмотки проволоки (N), при которых достигается соответствующая величина магнитного поля внутри прототипа (B_x) (справа от зависимостей).

Например, величина поля $B_x = 0.0001$ Т достигается при $B_0 = 0.01$ Тл и $N = 5$, при $B_0 = 0.06$ Тл и $N = 15$, $B_0 = 0.12$ Тл и $N = 23$ и т. д. Значение внутреннего поля, близкого к нулю ($B_x \approx 0$ Тл), можно получить, например, при $B_0 = 0.10$ Тл и 23 слоях проволоки.

Определено, что при удалении из сборки прототипа первого цилиндра из мягкого отожженного железа значения поля внутри прототипа увеличиваются. Например, при $B_0 = 0.10$ Тл и 23 слоях проволоки значение внутреннего поля составляет $B_x = 0.0020$ Тл, которое можно компенсировать увеличением числа слоёв проволоки.

Определено, что значение поля внутри прототипа зависит от диаметра отожженной проволоки, толщины прокладки между слоями проволоки, диаметра основного цилиндра из нержавеющей стали.

Для измерения величины магнитного поля использовался измеритель магнитной индукции Ш1-8, ошибка измерения каждой точки не превышала $\delta = 0.1\%$ [3].

На основе прототипа КМП был создан рабочий КМП (рис. 2 и 3(а)), состоящий из сваренных друг за другом трех цилиндров из нержавеющей стали диаметрами по порядку $\varnothing_1 = 15$ мм, $\varnothing_2 = 20$ мм и $\varnothing_3 = 25$ мм и длинами $l_1 = 15$ см, $l_2 = 30$ см, и $l_3 = 65$ см, соответственно. Число слоев намотанной отожженной проволоки по длине КМП было подобрано таким образом, чтобы при выводе электронов с энергией не менее 600 МэВ из ускорителя значения магнитного поля внутри КМП оставались нулевыми по всей траектории движения электронов, проходящей рядом с ускоряющим магнитом.

Таким образом, конструкция прототипа компенсатора магнитного поля позволила существенно уменьшить влияние внешнего магнитного поля по отношению к внутренним значениям, что дало возможность создать рабочую конструкцию компенсатора магнитного поля, которая успешно эксплуатируется при транспортировке электронного пучка от выходного окна ускорителя до входа в магнитооптический канал. Предполагается провести исследование характеристик прототипа КМП при охлаждении обмотки жидким азотом. Метод, используемый при создании КМП, можно применять для защиты от рассеянных магнитных полей также различных электронных устройств, например, фотоэлектронных умножителей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ю. А. Башмаков, В. А. Карпов, А. С. Яров, ЖТФ **54**(5), 905 (1984).
- [2] В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов и др., Ядерная физика и инжиниринг **11**(5), 278 (2020). <https://doi.org/10.1134/S2079562920040016>.
- [3] В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов и др., ПТЭ, № 2, 1 (2019). <https://doi.org/10.1134/S0032816219020162>.

- [4] В. И. Алексеев, В. А. Басков, В. А. Дронов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **47**(7), 18 (2020). <https://doi.org/10.3103/S1068335620070027>.
- [5] В. В. Устинов, Многослойный нейтронный детектор // Научно-квалификационная работа (диссертация) (ФИАН, Москва, 2023).

Поступила в редакцию 27 сентября 2023 г.

После доработки 25 декабря 2023 г.

Принята к публикации 26 декабря 2023 г.