

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 539.1.076

МАГНИТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА СПАСЧАРМ НА УСКОРИТЕЛЬНОМ
КОМПЛЕКСЕ У-70

© 2023 г. А. П. Мещанин^{а, *}, А. Н. Васильев^{а, b}, Ю. М. Гончаренко^а, В. А. Кормилицын^а,
Н. Г. Минаев^а, В. В. Мочалов^{а, b}, В. Л. Рыков^б, А. Д. Рябов^а, Т. Д. Рябова^а, А. В. Рязанцев^а,
П. А. Семенов^{а, b}, С. А. Сёмин^а, З. Г. Симонова^а

^аНИИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, Москва, 142281 Россия

^бНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

*E-mail: Alexei.Meschanin@ihep.ru

Поступила в редакцию 26.07.2022 г.

После доработки 01.08.2022 г.

Принята к публикации 02.08.2022 г.

Описана система из четырех магнитов, являющаяся частью экспериментальной установки СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70 для исследования спиновых эффектов в адронных взаимодействиях. Уникальный магнит с полем 2.4 Тл и однородностью поля на уровне 10^{-4} в рабочем объеме 60 см³ служит для накачки и удержания поляризации в поляризованной протонной замороженной мишени. Специальный широкоапертурный магнит является центральной частью спектрометра установки на основе дрейфовых трубок. Для прецизионного наведения пучка на центр мишени были изготовлены и введены в состав установки два небольших корректирующих магнита разработки НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

DOI: 10.56304/S2079562922030290

ВВЕДЕНИЕ

На ускорительном комплексе У-70 в Протвино проводится поляризационный эксперимент СПАСЧАРМ [1] с целью исследования спиновой структуры нуклона и спиновой зависимости сильного взаимодействия при энергиях У-70.

Экспериментальная установка СПАСЧАРМ, размещенная на вторичном пучке отрицательных частиц с импульсом ~26.5 ГэВ/с, показана на рис. 1.

В комплекс поляризованной протонной мишени эксперимента СПАСЧАРМ входит магнит “Динозавр” с высокой однородностью поля в ра-

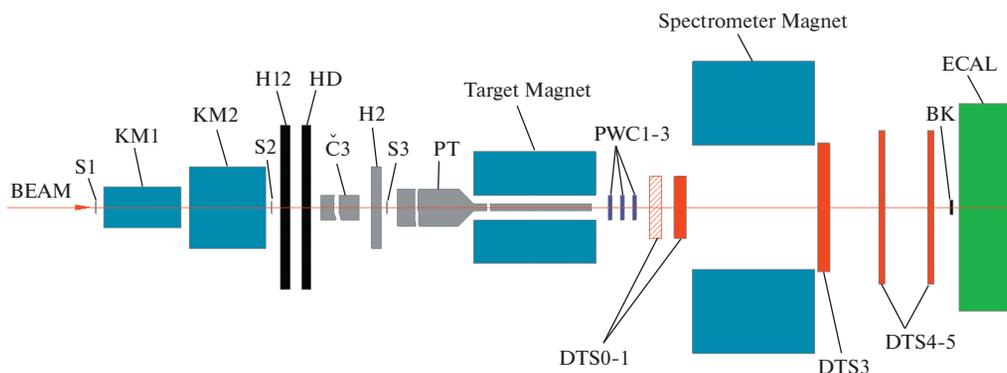


Рис. 1. Схема установки СПАСЧАРМ на канале №14 ускорительного комплекса У-70. S1, S2, S3 – пучковые сцинтилляционные счетчики; KM1, KM2 – корректирующие магниты типа СП-140; H12 – пучковые годоскопы X и Y; HD – прецизионные пучковые годоскопы X и Y; C3 – третий пороговый черенковский счетчик (первые два, C1 и C2, не показаны на рисунке, они далеко слева); H2 – пучковый годоскоп; PT – поляризованная мишень ЗППМ-200М; Target Magnet – магнит поляризованной мишени «Динозавр»; PWC1-3 – блок пропорциональных камер; DTS0-1 – малогабаритные дрейфовые камеры; Spectrometer Magnet – широкоапертурный магнит СПАСЧАРМ; DTS3, DTS4-5 – большие дрейфовые камеры; BK – пучковый счетчик; ECAL – электромагнитный калориметр ЧСПП-720 на базе свинцовых стекол ТФ1-000.

бочем объеме мишени 60 см^3 . Он обеспечивает работу критически важной подсистемы эксперимента СПАСЧАРМ – поляризованной мишени.

Передний универсальный широкоапертурный спектрометр имеет цель регистрировать одновременно все вторичные частицы в передней полусфере взаимодействий (по фейнмановской переменной $x_F > 0.3$) до поперечных импульсов $2 \text{ ГэВ}/c$. Отсюда следует, что для пучка с импульсом $26.5 \text{ ГэВ}/c$ угловой аксептанс экспериментальной установки должен быть порядка ± 110 мрад. При этом в спектрометре реализуется полная геометрия по азимутальному углу, что позволяет измерять спиновые асимметрии с предельно низкими систематическими погрешностями. Измерение и сравнение друг с другом поляризационных эффектов для большого набора разных реакций в широком кинематическом диапазоне принципиально важно для раскрытия роли спина в наиболее трудной для понимания непертурбативной области сильных взаимодействий. Спектрометрический магнит СПАСЧАРМ является центральной частью широкоапертурного переднего спектрометра.

Для точного наведения пучка на центр мишени в состав установки были введены два корректирующих магнита, созданных по чертежам НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, которые используются в каналах частиц ускорительного комплекса У-70 [2]. В данной работе подробно описаны эти четыре магнита эксперимента СПАСЧАРМ.

1. КОМПАКТНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТ “ДИНОЗАВР” ДЛЯ “ЗАМОРОЖЕННОЙ” ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ПРОТОННОЙ МИШЕНИ

Получение (“накачка”) поляризации в мишени ЗППМ-200М осуществляется в поперечном к пучку магнитном поле электромагнита “Динозавр” с теплыми обмотками [3]. Он является самым развитым развитием оригинального проекта магнита “Джин” [4], который на протяжении многих лет обеспечивал работу поляризованной мишени в экспериментах ПРОЗА [5] и ПРОЗА-М [6]. Общий вид магнита “Динозавр” показан на рис. 2.

Мишень ЗППМ-200М размещается в центре его рабочего зазора. Поле в зазоре формируется полюсами из пермендюра 49КФ, шириной 164 мм, длиной 1000 мм и толщиной 80 мм. Поток поля замыкается через магнитопроводы, изготовленные из стали марки Ст.3.

Накачка поляризации протонов основана на эффекте возбуждения электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) с поляризацией атомных электронов в магнитном поле и последующей передачей поляризации протонам в результате цепочки атомных переходов [5].

Резонансная частота ЭПР зависит от индукции магнитного поля. Имеющийся в нашем распоряжении СВЧ-генератор покрывает диапазон частот от 66.17 до 67.17 ГГц. Для ЭПР это соответствует величине индукции от 2.365 до 2.401 Тл, необходимой для успешной накачки поляризации протонов в мишени. На этом основании рабочее поле магнита “Динозавр” в режиме накачки поляризации было выбрано равным 2.4 Тл.

Верхний и нижний магнитопроводы вместе с полюсами могут симметрично сдвигаться или раздвигаться с помощью силовой системы перемещения, которая состоит из электродвигателя мощностью 5 кВт, двухступенчатого червячного редуктора и цепной передачи. Общий коэффициент передачи силовой системы равен 700. Несущие силовые конструкции состоят из двух стальных плит толщиной 50 мм, скрепленных четырьмя стойками.

В сдвинутом состоянии при высоте зазора между полюсами 75 мм и номинальном токе питания магнита 1440 А поле в его центральной части достигает 2.4 Тл. В этом режиме в течение 4–6 ч осуществляется накачка поляризации протонов в мишени, охлажденной до температуры порядка 0.2–0.3 К. Затем, после охлаждения мишени еще на порядок (до $\sim 0.03 \text{ К}$), начинается процедура раздвижки полюсов до 250 мм, открывая апертуру магнита для вторичных частиц, вылетающих из мишени, в пределах ± 300 мрад по горизонтали и ± 250 мрад по вертикали. В начале процедуры раздвижки полюсов поле в рабочем зазоре снижается до 0.65 Тл, чтобы не бороться с полной силой притягивания друг к другу двух половинок магнита, при 2.4 Тл равной примерно 40–50 т, и тем самым не повредить раздвигающий механизм. Далее, в несколько шагов, верхняя и нижняя половинки магнита раздвигаются с одновременным постепенным увеличением тока питания так, чтобы магнитная индукция в зоне мишени никогда не опускалась ниже $\sim 0.4 \text{ Тл}$. По завершению этой фазы раздвижки, занимающей 10–15 мин, ток питания магнита вновь находится на номинальных 1440 А, а поле в зоне мишени – $\sim 0.4 \text{ Тл}$. И в нем поляризация мишени удерживается на время набора статистики на пучке в течение 1–2 сут.

Для успешной накачки поляризации протонов по всему рабочему объему мишени необходимо, чтобы неоднородность магнитного поля внутри этого объема не превышала естественной ширины линии поглощения сигнала ядерного магнитного резонанса в идеально-однородном поле. Эта ширина обусловлена диполь-дипольным взаимодействием протонов в веществе мишени и структурой вещества [7]. В пентаноле $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$ с добавкой радикала ТЕМПО, используемом в настоящее время в качестве рабочего вещества, относительная

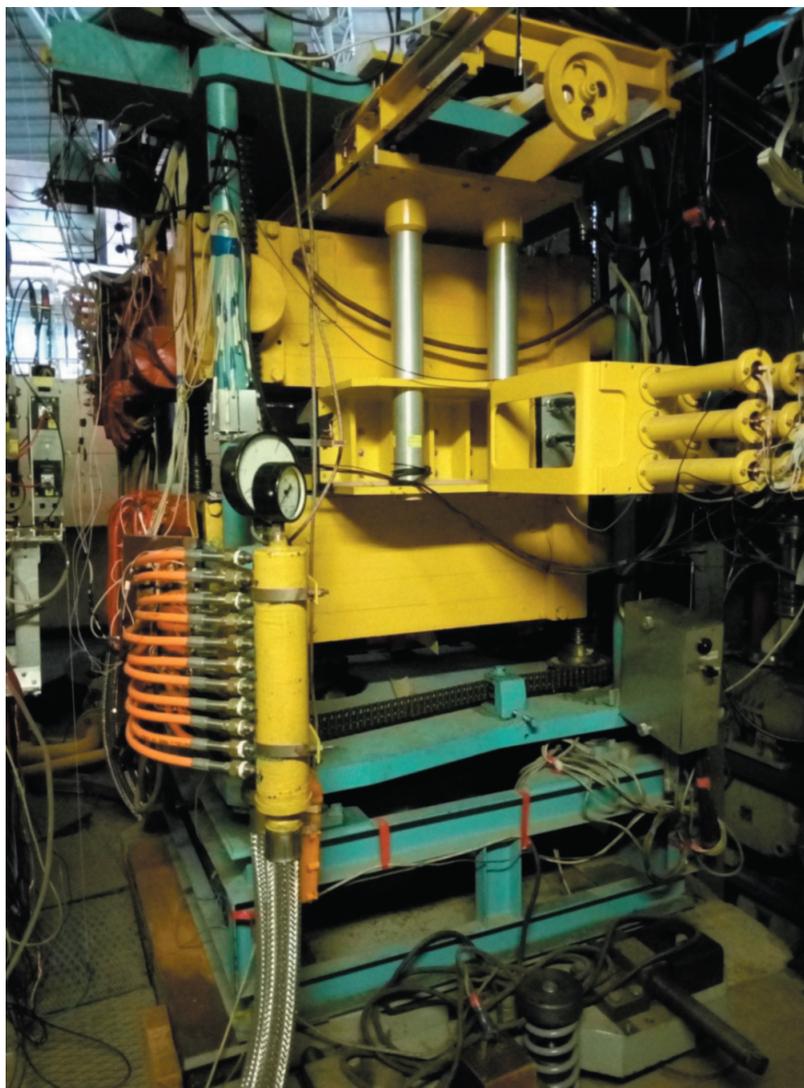


Рис. 2. Общий вид магнита “Динозавр” с введенной в рабочее положение вето системой и рабочими коммуникациями на установке СПАСЧАРМ на канале № 14 ускорительного комплекса У-70.

ширина линии поглощения (RMS) в поле 2.4 Тл составляет величину порядка $\sim 1.65 \cdot 10^{-4}$. Построить теплый магнит с ферромагнитными полюсами, обеспечивающий столь высокую однородность поля при его величине, близкой к насыщению полюсов, является непростой задачей. На стадии проектирования магнита были проведены многочисленные расчеты [8] с целью оптимизации его параметров.

Была выбрана конструкция с двумя основными и двумя формирующими обмотками. Встроенные в магнитопроводы две основные катушки, каждая из которых состоит из 5 секций (5×8 витков), изготовлены из медной трубки 8×8 мм² с внутренним диаметром 4.5 мм под обессоленную воду. Формирующие обмотки, частично заполняющие межполюсное пространство и оставляю-

щие свободную апертуру шириной 80 мм, состоят из трех секций (3×5 витков). Полное число витков в обмотке равно 110. Электрически все секции соединены последовательно, а по воде — параллельно. Для формирования поля с хорошей однородностью потребовалось также размещение в углах апертуры треугольных стальных шимм по всей длине полюсов, которые были приклеены к полюсам эпоксидной смолой.

В результате в центральной части магнита в цилиндре, диаметром 20 мм, и на длине 200 мм было получено однородное поле с индукцией 2.4 Тл с максимальной относительной вариацией от минимума к максимуму $13 \cdot 10^{-4}$ и среднеквадратичным отклонением от константы по объему $4.3 \cdot 10^{-4}$. Графически топография относительных отклонений полученного поля на поверхности

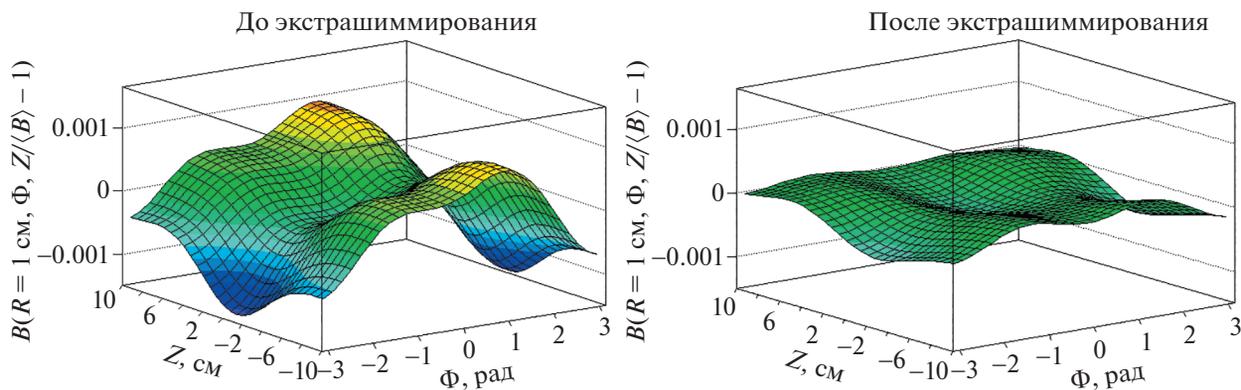


Рис. 3. Относительные вариации магнитного поля на поверхности цилиндра диаметром 20 мм и длиной 200 мм. Слева – до проведения дополнительного шиммирования; справа – после.

мишени от его средней величины по объему $\langle B \rangle$ показана на рис. 3 слева.

Однако такие отклонения от однородности были все еще слишком велики для работы с поляризованной мишенью. Причиной тому является не только конечная точность механического изготовления деталей магнита и их сборки. Серьезной проблемой в режиме насыщения является неопределенность в магнитных характеристиках используемых ферромагнитных материалов и в их вариации от образца к образцу и даже в пределах одного элемента конструкции. С целью улучшения качества поля было предпринято дополнительное шиммирование в апертуре магнита. Результатом этой работы стало заметное улучшение картины поля, которая представлена справа на рис. 3. В ней максимальная относительная вариация составляет $\sim \pm 4 \cdot 10^{-4}$, а среднеквадратичное отклонение от константы по объему $\sim \pm 1.3 \cdot 10^{-4}$, что уже вполне вписывается в допустимую неоднородность $\sim \pm 1.65 \cdot 10^{-4}$ (см. выше). Свидетельством успешности шиммирования является то, что в таком поле была получена устойчивая поляризация протонов в пентаноловой мишени до 75%, и на такой поляризации был успешно проведен сеанс по набору статистики на пучке.

В заключение перечислим некоторые технические характеристики магнита “Динозавр”, которые не были упомянуты выше в тексте:

- Электрическое напряжение на обмотке при номинальном токе 1440 А равно 207 В.
- Система охлаждения магнита рассчитана на обессоленную воду при перепаде давления 20 атм. Температура воды на входе должна быть не выше 30°C. Общий расход воды при указанных условиях составляет 8 м³/ч.

Для питания электромагнита используется тиристорный источник питания 28ТП2 ($U_{\text{ном}} = 215$ В, $I_{\text{ном}} = 1500$ А). Тиристорный преобразователь выполнен по 3-х фазной симметричной мостовой

схеме Ларионова. Для подавления пульсаций выпрямленного напряжения применен пассивный Г-образный LC фильтр.

Исходя из специфического характера действующих на систему возмущений, которые можно условно разделить на высокочастотные колебания питающей сети и низкочастотные, включая прогрев нагрузки, структура системы управления тиристорным преобразователем выбрана двухконтурной. Это обеспечивается ее разделением на быстродействующий контур стабилизации напряжения и контур медленного действия – контур тока, что позволяет получить высокую степень стабилизации при сравнительно простой коррекции.

В режиме накачки поляризации в мишени существуют жесткие ограничения на пульсации поля, не более $\sim \pm 1.5 \cdot 10^{-4}$, что и требования к однородности поля. Во всех режимах допустимая величина пульсаций поля ограничивается также тепловой нагрузкой от вихревых токов на камеру растворения в рефрижераторе. При рабочих температурах 30 мК она не должна превышать 100 мкВт. Оценки показывают, что на частоте 300 Гц, которая является основной в спектре 6-пульсных тиристорных преобразователей, это соответствует ограничению на амплитуду пульсаций поля не выше 0.25 мТл в режиме удержания поляризации.

На рис. 4 представлена зависимость индукции $B(I)$ от тока питания I в центре рабочей области магнита “Динозавр” при сомкнутом ярме.

2. ШИРОКОАПЕРТУРНЫЙ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МАГНИТ СПАСЧАРМ

Для целей импульсного анализа заряженных частиц в эксперименте СПАСЧАРМ используется большой магнит (см. рис. 5) с апертурой $X \times Y = 2.3 \times 1$ м², обеспечивающий регистрацию вто-

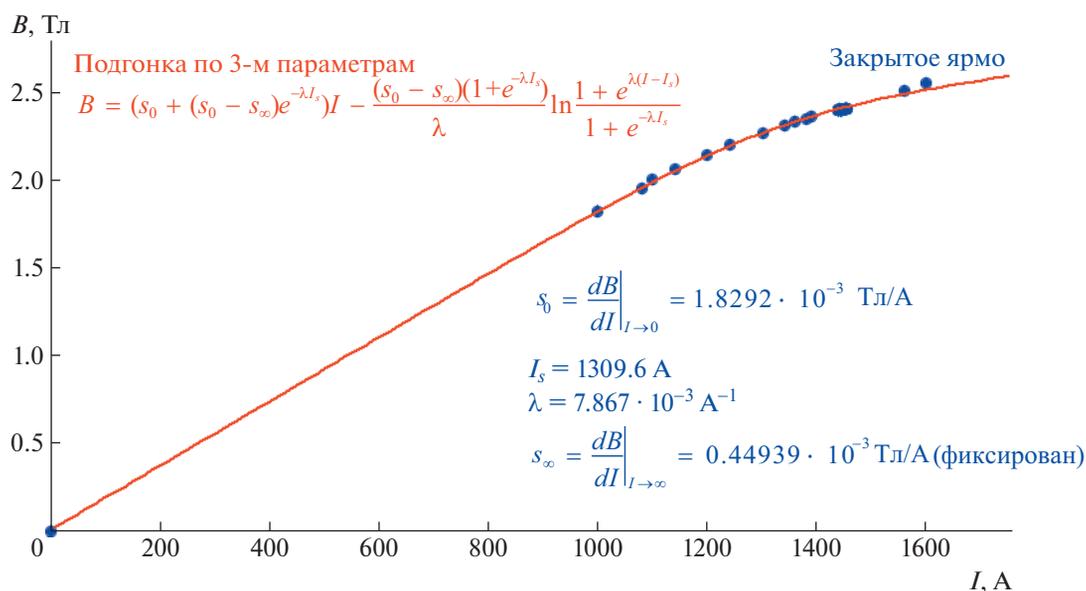


Рис. 4. Зависимость индукции $B(I)$ в центре магнита “Динозавр” от тока питания при сомкнутом ярме.

ричных частиц системой всех трековых детекторов в угловом диапазоне до $\sim \pm 110$ мрад по вертикали, и, потенциально, до $\sim \pm 240$ мрад по горизонтали, что уверенно перекрывает требования к угловому акцептансу спектрометра, вытекающие из целей физической программы эксперимента.

Этот магнит, изначально С-образный, на величину магнитного поля 1 Тл при вертикальном зазоре 1 м, был построен в середине 1980-х гг. для эксперимента НЕПТУН [9] на коллайдере УНК [10]. Для работы в составе эксперимента СПАС-ЧАРМ магнит был заметно модернизирован, а именно: ярмо было переделано в Ш-образное с использованием 30% предыдущего ярма, внесены изменения в обмотку магнита, а также были изготовлены новые экраны для защиты трековых детекторов от рассеянного магнитного поля. Для оптимизации геометрии, включая расположение защитных экранов, выбора оптимальных режимов питания магнита и т.д. были проведены детальные численные расчеты магнитного поля для большого количества вариантов. Были также сделаны прецизионные измерения топографии поля в рабочей апертуре магнита с точностью $\sim (0.1 - 0.3)\%$.

Преимущественно вертикальное магнитное поле формируется в апертуре спектрометрического магнита СПАСЧАРМ двумя стальными полюсами с размерами $X \times Z = 800 \times 1000$ мм². Магнитный поток замыкается через две симметричные ветви стального ярма с сечением 850×1000 мм² каждая. Обмотка магнита состоит из двух секций: верхней и нижней, в каждой из которых по 256 витков. В конфигурации, используемой в настоящее время, секции подключены к источнику

питания параллельно. Магнит имеет следующие рабочие параметры:

- рабочий ток составляет 2000 А/виток;
- проводник — это медная трубка с квадратным сечением 16.5×16.5 мм² и внутренним отверстием под охлаждающую воду диаметром 10 мм;
- сопротивление одной секции обмотки 0.105 Ом;
- ограничение на удельное сопротивление охлаждающей воды — не менее 10000 Ом см;
- перепад давления охлаждающей воды на обмотке 20 атм;
- вес магнита 150 т.

Для питания магнита используется генератор №1ГП-550-750 ($U_{\text{ном}} = 150$ В, $I_{\text{ном}} = 3670$ А) электромашинного преобразовательного агрегата 10АП. Стабилизация тока через нагрузку осуществляется цепью обратной связи по току, воздействующей на систему управления маломощного тиристорного преобразователя возбуждения генератора ($U_{\text{возб.макс}} = 250$ В, $I_{\text{возб.макс}} = 13.2$ А).

Расчетная зависимость индукции поля в центре магнита от тока питания показана на рис. 6.

В настоящее время из-за ограничений по источнику питания магнит эксплуатируется при номинальном токе 1 кА/виток. Для отвода тепла, выделяемого при работе магнита, через обмотку прокачивается обессоленная холодная вода с температурой на входе не выше 30°C под давлением 11 атмосфер. При этом на выходе из магнита температура воды обычно не превышает 50°C.

Магнит позиционирован так, что его центр находится на расстоянии 3.26 м ниже по пучку от

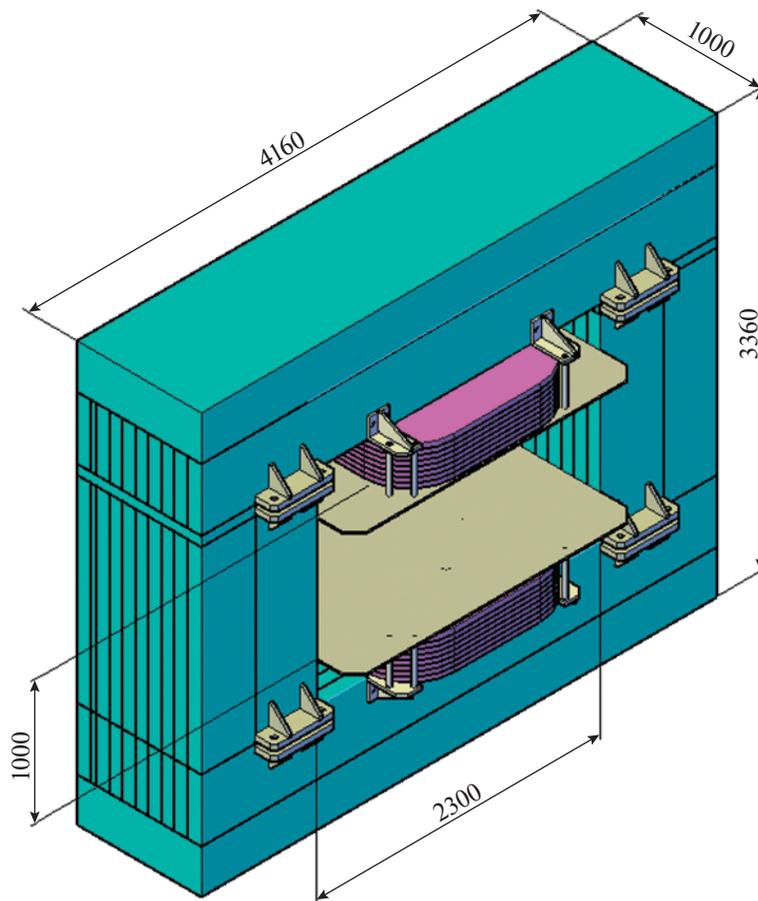


Рис. 5. Общий вид Ш-образного ярма магнита СПАСЧАРМ.

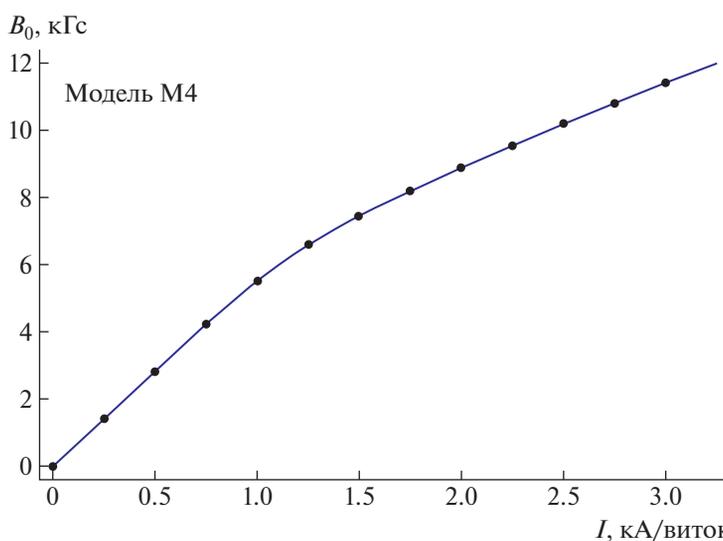


Рис. 6. Расчетная зависимость магнитной индукции в центре магнита от тока на виток обмотки.

центра поляризованной мишени. При этом остается около 1.5 м для размещения трековых детекторов между двумя магнитами в области ослаб-

ленного магнитного поля. На расстоянии ~0.85 м вверх по пучку от центра магнита размещен стальной экран, толщиной 100 мм, с окном, раз-

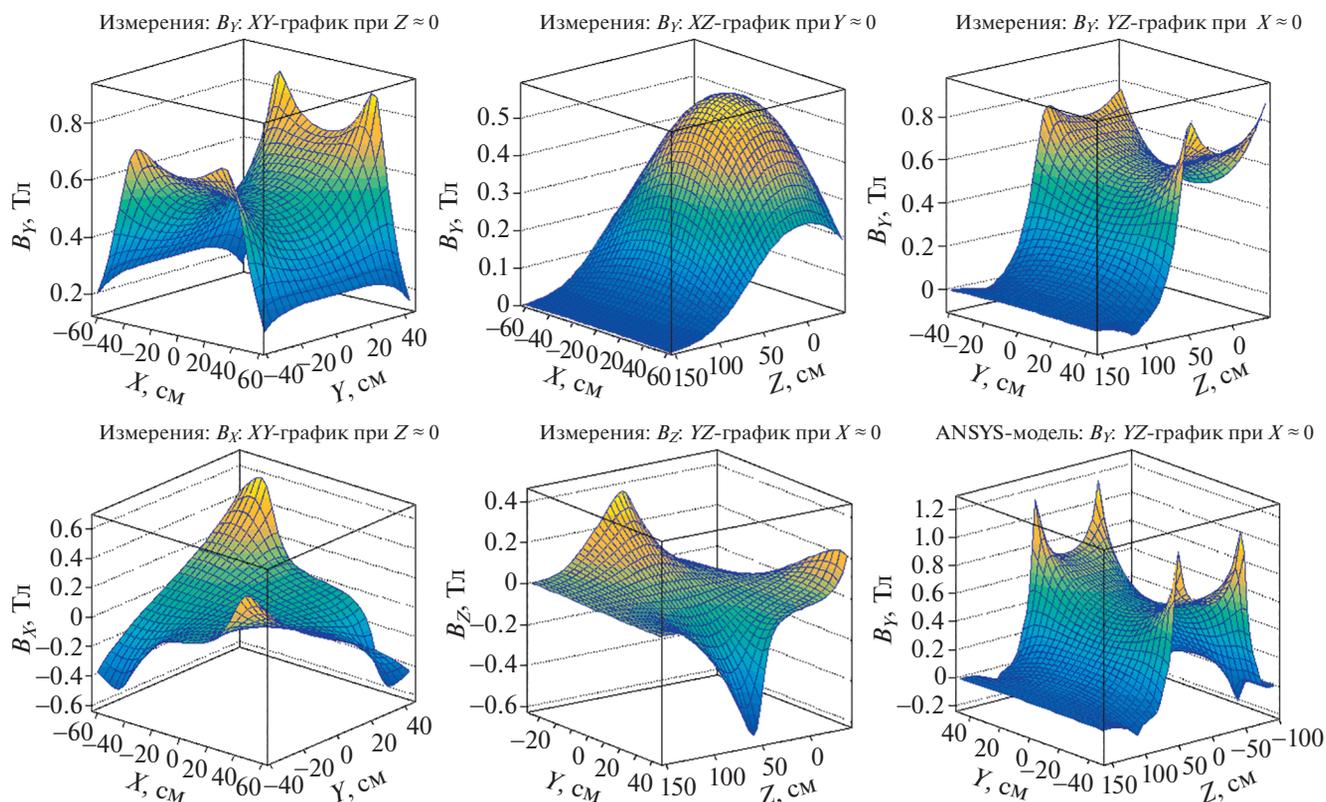


Рис. 7. Некоторые разрезы поля в апертуре магнита в плоскостях, проходящих через его центр. Пять из 6-ти распределений взяты из измерений, а 6-е в правом нижнем углу – результат численного моделирования [1] с использованием программы ANSYS.

мерами $X \times Y = 2.3 \times 0.7 \text{ м}^2$ для защиты трековых детекторов от рассеянного магнитного поля. Для тех же целей ниже по пучку на расстоянии $\sim 1.7 \text{ м}$ от центра магнита установлен сдвоенный экран из двух листов железа, толщиной 50 мм каждый, со значительно бóльшим окном: $X \times Y = 2.3 \times 1.5 \text{ м}^2$.

Магнитное поле в магните с такой геометрией, очевидно, далеко от однородного, что иллюстрируется некоторыми распределениями, показанными на рис. 7.

Для целей использования магнита в трекинге заряженных частиц были проведены детальные измерения топографии поля системой датчиков Холла [11] в объеме, размерами $X \times Y \times Z = 1.24 \times 0.84 \times 1.96 \text{ м}^3$. Измерения всех трех компонент поля были сделаны в 34 496 точках на решетке с шагом 4 см по каждой из координат. Датчики Холла были прокалиброваны в диапазоне индукций $\pm 0.8 \text{ Тл}$ при помощи ЯМР-магнитометра [12] с точностью $\sim (0.4\text{--}0.6) \text{ мТл}$. Во время измерений топографии поля, полный цикл которых занял $\sim 10 \text{ ч}$, “плавание” тока питания и поля в магните не превышало $\pm 0.01\%$. Изменения от-

слеживались по монитору тока и двум датчикам ЯМР, зафиксированным на полюсах.

Измерениями была покрыта значительная часть рабочего объема магнита, но, к сожалению, не весь объем. Из-за конструктивных особенностей магнита и ограничений системы перемещения датчиков Холла [11] не удалось сделать измерения на расстояниях, удаленных более чем на 0.4 м от центра магнита вверх по пучку, а также вблизи границ апертуры. Поэтому в настоящее время в анализе данных для трассировки заряженных частиц в магните используется расчетная картина поля, сверенная с магнитными измерениями. Среднеквадратичное отклонение (RMS) расчетов и измерений по всем 101920 измеренным значениям всех трех компонент поля было найдено равным $\pm 1.9 \text{ мТл}$, что составляет $\pm 0.35\%$ от поля в центре магнита.

Значительный вклад в отклонения по всему объему вносит ошибка позиционирования датчиков вблизи ребер и углов полюсов, где градиенты индукции очень велики и достигают $\sim 5 \text{ мТл/мм}$. Если ограничиться только областью вдали от полюсов магнита ($|Y| < 30 \text{ см}$), то здесь $\text{RMS} = \pm 0.95 \text{ мТл} = \pm 0.18\%$ от поля в центре магнита. По абсолют-

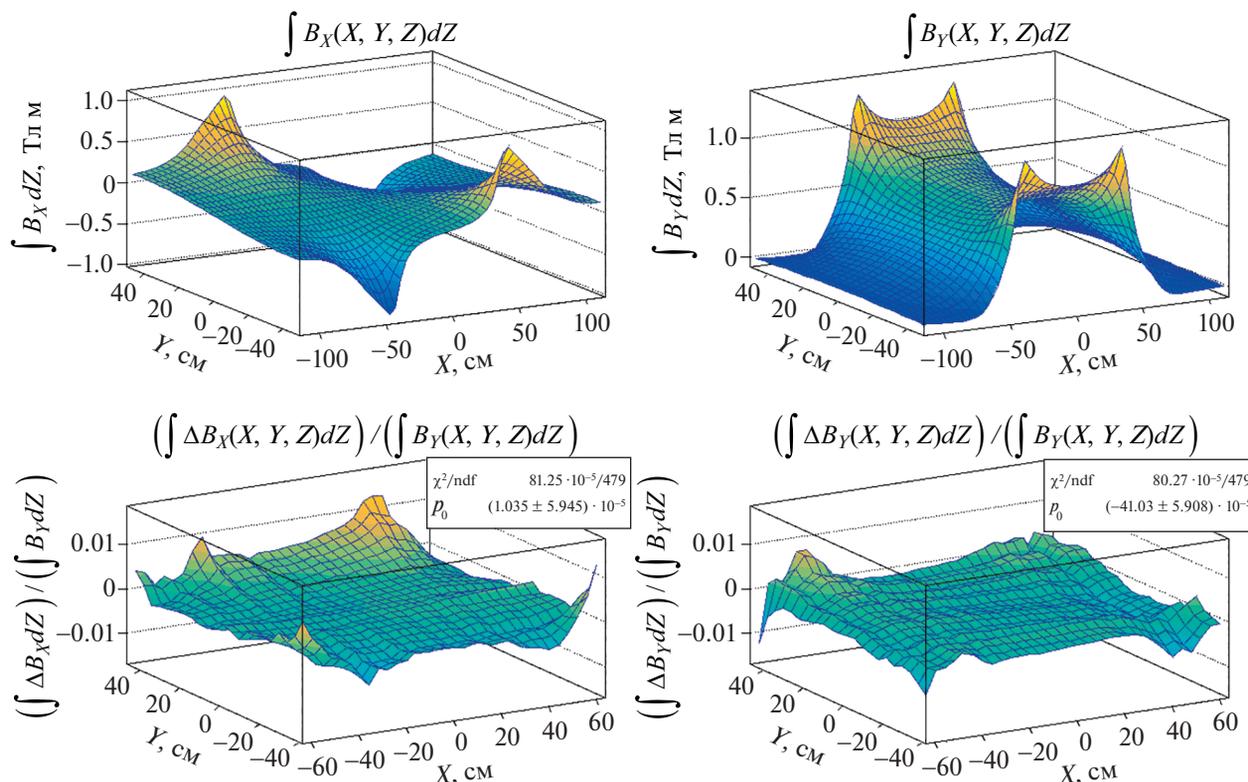


Рис. 8. Иллюстрация к степени согласия расчетов [1] и измерений по интегралам вдоль оси Z (параллельно пучку) от поперечных компонент поля B_x и B_y . Верхняя строка: расчетные распределения интегралов в поперечной плоскости X – Y для полного рабочего объема магнита. Нижняя строка: относительные разности между расчетными и измеренными интегралами, нормированные на интегралы от основной компоненты B_y , для части рабочего объема, где были сделаны измерения. Обозначение: $\Delta B(X, Y, Z) = B_{\text{расчет}}(X, Y, Z) - B_{\text{измерения}}(X, Y, Z)$. В нижней строке числа в стат-боксах соответствуют фитированию константой с единичными ошибками 2D-распределений в полосе $|Y| < 30$ см.

ной нормировке, в среднем по объему, расчетная и измеренная магнитные индукции практически совпали: разница составляет $\sim 0.13\%$ при ошибке процедуры сравнения, оцененной в $\pm 0.15\%$.

Некоторые иллюстрации к сравнению расчетов и измерений представлены на рис. 8 в терминах интегралов поля вдоль оси Z . Показаны только две поперечные компоненты, которые вносят доминирующий вклад в отклонение в магните заряженных частиц, летящих под малыми углами к оси Z . По среднеквадратичным отклонениям от нуля для всей показанной X – Y -плоскости имеет место согласие в пределах $\sim \pm 0.3\%$ для интеграла от B_x и $\sim \pm 0.18\%$ – для интеграла от B_y . Вдали от полюсов (при $|Y| < 30$ см) согласие не хуже, чем $\sim \pm 0.14\%$ для обеих компонент.

Измеренная индукция в центре магнита равна 0.5398 ± 0.0004 Тл, а интеграл поля вдоль оси магнита равен 0.703 ± 0.001 Тл м. Отсюда эффективная длина равна ~ 1.3 м. Величина рассеянного поля в зоне ближайшего трекового детектора вы-

ше по пучку достигает примерно 15–17 мТл, а в зоне ближайшего детектора ниже по пучку – 0.2 мТл.

3. КОРРЕКТИРУЮЩИЕ ПУЧКОВЫЕ МАГНИТЫ КМ1 И КМ2

Электромагниты-корректоры СП-140 спроектированы в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова в 1968 году (чертеж №ОА502738). В производственных условиях ИФВЭ по этому чертежу для установки СПАСЧАРМ было изготовлено два идентичных магнита (см. рис. 9) для прецизионного наведения пучка на центр поляризованной мишени.

Габариты магнита $662 \times 630 \times 310$ мм³, вес 380 кг. При рабочем токе магнита 9 А в его рабочей апертуре высотой 100 мм и шириной 200 мм, магнитное поле достигает 0.1 Тл. Размеры апертуры были выбраны так, чтобы в нее полностью укладывался пучок в зоне размещения магнитов-корректоров. Длина магнита по железным полюсам 500 мм. Изменением тока возбуждения обмоток

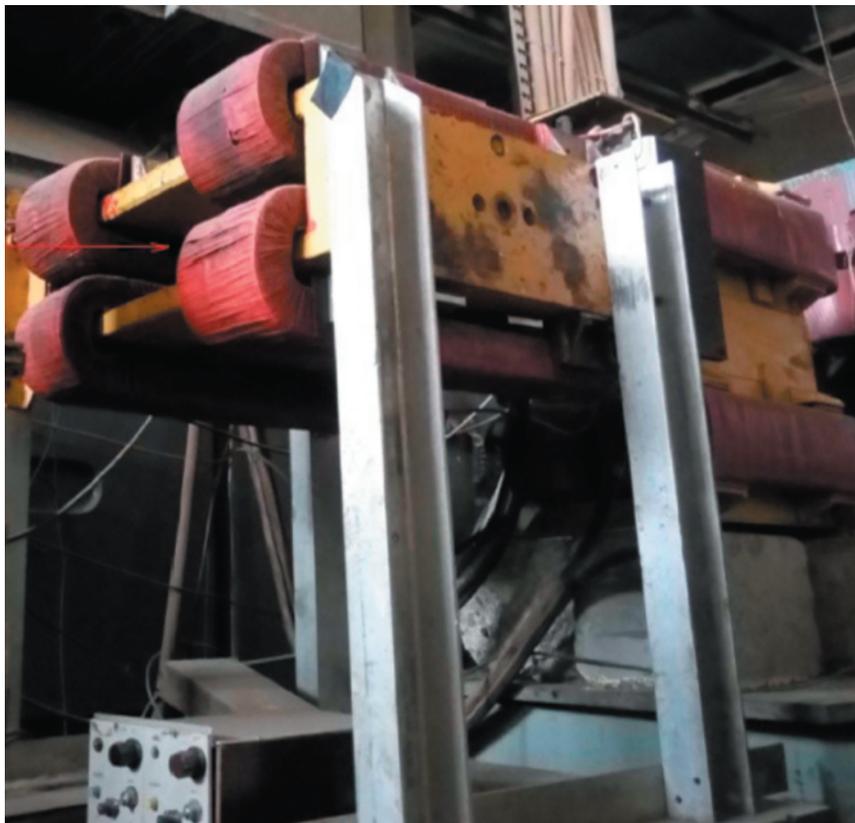


Рис. 9. Общий вид расположения корректирующих магнитов КМ1 и КМ2 на канале № 14 У-70.

можно добиться наведения центра пучка частиц на центр поляризованной мишени ЗППМ-200М с точностью не хуже, чем 0.3 мм. Размер пучка (полная ширина на полувысоте) в мишени диаметром 20 мм составляет 7 мм.

Обмотка магнита СП-140 состоит из четырех катушек, включенных последовательно. Число витков в обмотке 2240, средняя длина витка 1.3 м, проводник—провод ПСД. Сопротивление обмотки при 15°C равно 8.4 Ом, индуктивность элек-

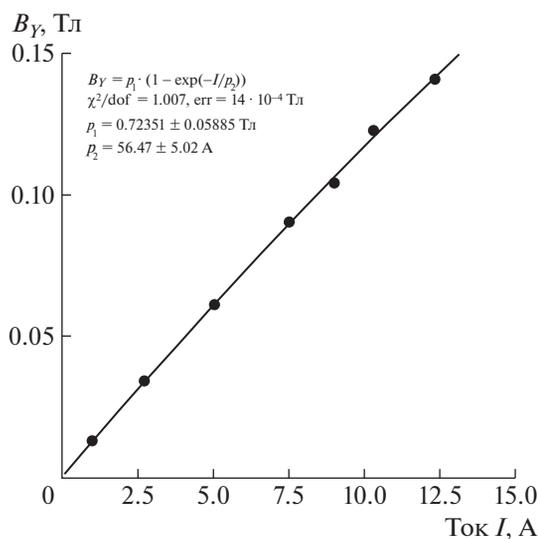


Рис. 10. Зависимость индукции $B_y(I)$ в центре магнита СП-140 от тока питания I .

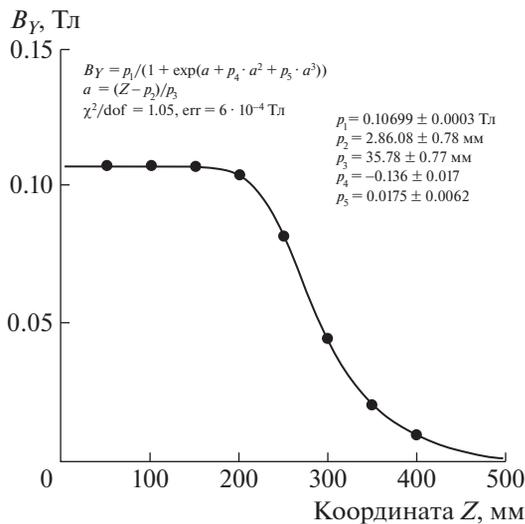


Рис. 11. Зависимость индукции $B_Y(Z)$ в центре магнита СП-140 вдоль центральной оси при токе питания 9 А.

ромагнита в сборе 4.4 Гн, охлаждение обмотки естественное воздушное, максимальный перегрев меди обмотки 65°C.

На рис. 10 и 11 представлены некоторые результаты измерения магнитного поля магнита СП-140 при помощи датчика Холла. Видно, что поле линейно по току вплоть до величины тока 12.5 А и однородно по длине вплоть до 200 мм от центра магнита.

В настоящее время в качестве источников питания магнитов используются выпрямители типа ВУ-110/24А, которые при напряжении в сети 220/380 В дают на выходе выпрямленное напряжение 110 В и ток 24 А. Вес выпрямителя 60 кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в настоящей работе электромагниты эксперимента СПАСЧАРМ являются органической частью физической установки и выполняют в ней следующие функции:

- магнит “Динозавр” с индукцией 2.4 Тл при однородности магнитного поля $\sim \pm 0.013\%$ в рабочем объеме мишени 60 см³ обеспечивает накачку поляризации протонов до 75% с последующим удержанием поляризации в течение 1–2 суток;
- широкоапертурный магнит СПАСЧАРМ обеспечивает одновременное измерение импульсов с точностью, потенциально, до $\sim \pm(0.1-0.3)\%$ для всех заряженных вторичных частиц в передней полусфере взаимодействий (по фейнмановской переменной $x_F > 0.3$) до поперечных импульсов 2 ГэВ/с при непрерывном 2π -покрытии по азимутальному углу в пределах акцептанса уста-

новки, что минимизирует систематические ошибки в измерениях спиновых эффектов;

- прецизионное наведение пучка частиц в канале на центр поляризованной мишени выполняется корректирующими магнитами КМ1 и КМ2.

В течение ряда сеансов работы на пучке описанные здесь магниты показали хорошую надежность функционирования и стабильность параметров. На последующее десятилетие планируется дальнейшее их использование в программе эксперимента СПАСЧАРМ на ускорительном комплексе У-70.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-12-00164). Работа выполнена в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ при частичной финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки (программа Приоритет-2030 в НИЯУ МИФИ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Абрамов В.В. и др.* // Концептуальный проект эксперимента СПАСЧАРМ. Препринт № 2019-12. 2019. Протвино: ИФВЭ.
2. *Бондаренко Е.Д. и др.* // Система питания корректирующих магнитов каналов пучков с дистанционным управлением от ЭВМ. Препринт № 90-58. 1990. Протвино: ИФВЭ.
3. *Грачев О.А. и др.* // Приб. техн. эксперим. 1993. Т. 36 (3). С. 189.
4. *Бурхин М.М. и др.* // Приб. техн. эксперим. 1981. Т. 24 (1). С. 30.
5. *Аввакумов И.А. и др.* // Установка ПРОЗА для исследования поляризованных эффектов в зарядо-вообменных процессах. Препринт № 81-15. 1981. Серпухов: ИФВЭ.
6. *Апокин В.Д. и др.* // Приб. техн. эксперим. 1998. Т. 41 (4). С. 23.
7. *Алферов В.Н. и др.* // Приб. техн. эксперим. 2019. № 3. С. 157.
8. *Дайковский А.Г., Португалов Ю.И.* // Пакет программ для решения двумерных задач магнитостатики методом конечных элементов. Препринт № 78-68. 1978. Серпухов: ИФВЭ.
9. *Solovianov V.L.* // Proc. Workshop on the Experimental Program at UNK. 1988. Protvino. P. 191.
10. Ускорительно-накопительный комплекс на энергию 3000 ГэВ (физическое обоснование). Препринт № 93-27. 1993. Протвино: ИФВЭ.
11. *Абрагам А.* Ядерный магнетизм. 1963. Москва: Издат. иностр. лит. Гл. IV.
12. *Карпов Г.В. и др.* // Прецизионные магнитометры на основе ЯМР в стандарте VME. Препринт № 2004-55. 2004. Новосибирск: ИЯФ СО РАН.

Magnets of the SPASCHARM Experiment at the U-70 Accelerator Facility

A. P. Meshchanin^{1, *}, A. N. Vasiliev^{1, 2}, Yu. M. Goncharenko¹, V. A. Kormilitsyn¹, N. G. Minaev¹,
V. V. Mochalov^{1, 2}, V. L. Rykov², A. D. Ryabov¹, T. L. Ryabova¹, A. V. Ryazantsev¹, P. A. Semenov^{1, 2},
S. A. Semin¹, and Z. G. Simonova¹

¹*Institute for High Energy Physics, National Research Centre “Kurchatov Institute”, Protvino, Moscow oblast, 142281 Russia*

²*National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

**e-mail: Alexei.Meschanin@ihep.ru*

Received July 26, 2022; revised August 1, 2022; accepted August 2, 2022

Abstract—A system of four magnets is described, which is part of the experimental installation of the SPASCHARM at the U-70 accelerator facility for the study of spin effects in hadron interactions. A unique magnet with the field of 2.4 T and the field uniformity at the level of 10^{-4} in the working volume of 60 cm^3 serves to pump and retain polarization in a polarized proton frozen target. A special wide-aperture magnet is the central part of the spectrometer of the installation based on drift tubes. For precision guidance of the beam to the center of the target, two small-sized correcting magnets developed by the Efremov Research Institute of Electrophysical Equipment (NIIIEFA) were manufactured and introduced into the installation.

Keywords: experimental setup, polarized target, spectrometer magnet, uniform magnet field, measurement