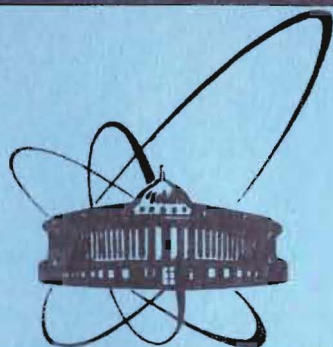


85-567



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P9-85-567

В.Ф.Буринов, Я.Кокавец*, С.И.Кукарников,
В.М.Лачинов, В.А.Прейзендорф, А.А.Сабаев,
В.В.Тищенко, Л.Цеснак*, Н.Б.Рубин

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ
МАГНИТОКАЛИБРОВОЧНЫЙ СТЕНД
Конструкция

Доклад на III Всесоюзной конференции
"Методы и средства измерения параметров
магнитного поля", Ленинград, 1985 г.

* Электротехнический институт САН, Братислава

1985

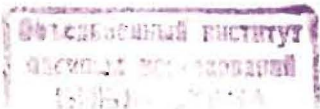
В последние годы в ускорительной технике и в экспериментальной физике все шире применяются сверхпроводящие магнитные системы, чтобы повысить используемые в установках магнитные поля до 4 ± 5 Т, поднять КПД систем питания магнитов и достичь более высоких технических результатов в установках. В связи с этим создаваемая магнитоизмерительная аппаратура должна работать в расширенном диапазоне магнитных полей и в ряде случаев с предельно высокой (до $\sim 0,001\%$) точностью измерений. Реализация подобных магнитометров невозможна без соответствующего метрологического обеспечения - магнитной меры или магнитокалибровочного стенда. С этой целью в ОНМУ ОИЯИ для обеспечения магнитных измерений в сверхпроводящих и в "теплых" магнитных системах (программы УНК и УКТИ) создан специальный сверхпроводящий магнитокалибровочный стенд (СМС) с теплым полем в рабочем объеме.

СМС значительно расширил возможности настройки и калибровки магнитометров, например, холловских, по сравнению с аналогичными на стенде с электромагнитом на железном сердечнике, имеющимся в ОНМУ. Кроме того, что повышено верхнее значение магнитного поля с $2,2$ Т до ~ 5 Т и снижено магнитное поле до ~ 0 , увеличен объем с высокой однородностью поля до ~ 60 см³ и имеется возможность размещения в нем датчиков как поперечного, так и продольного типа (диаметр апертуры рабочего объема ~ 90 мм). При этом однородность поля улучшена с $0,1\pm 0,01\%/см$ до $\sim 0,001\%/см$. Значительно снижена мощность системы питания (до ~ 1 кВт), а в режиме "замороженного" магнитного поля внешнего питания не требуется. В этом режиме обеспечивается особо стабильное магнитное поле в рабочем режиме (спад поля менее $0,01\%/см$), что весьма существенно для калибровочных работ, а сама магнитная система СМС экранирует рабочий объем от внешних магнитных помех.

ВЫБОР И РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СМС

Исходя из требований к магнитному полю СМС (высокая однородность, относительно большой рабочий объем и др.) из двух возможных вариантов магнитной системы (катушки Гельмгольца и цилиндрическая катушка с коррекцией) выбрана конструкция последнего типа. Сверхпроводящий соленоид (СПС) в виде цилиндрической катушки с корректирующими обмотками по краям более компактен, требует меньше провода и обеспечивает относительно более высокую однородность поля в большем объеме. Теплый рабочий объем в центре соленоида обеспечивается т.н. антикриостатом цилиндрической формы внутри СПС.

Диаметр апертуры антикриостата выбран равным 90 мм и, соответственно, внутренний диаметр обмотки СПС - 120 мм. Это определилось реально достижимыми минимальными размерами датчиков опорного ЯМР -



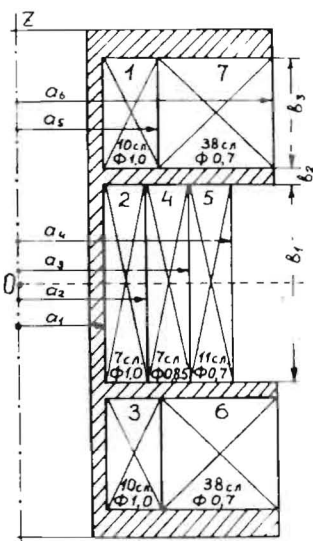


Рис.1. Форма обмотки СПС.

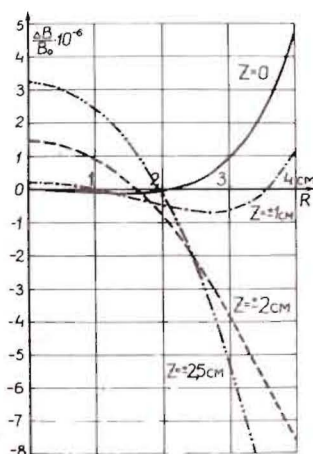


Рис.2. Расчетное распределение магнитного поля в рабочей области СПС.

магнитометра, а также габаритами калибруемых существующих и разрабатываемых холловских пробников, которые будут располагаться в рабочем объеме обычно совместно, например, вдоль оси СПС. Доступ в рабочий объем возможен с обоих концов антикриостата СМС.

Предварительный выбор структуры и конструкции СПС и ее расчет с точки зрения оптимизации расхода сверхпроводящего провода (СПП) и получения высокой однородности магнитного поля в рабочем объеме проведен в [1].

Для минимизации расхода СПП основная и корректирующая обмотки СПС разделены на цилиндрические секции (рис.1) с различной средней плотностью тока, что достигается использованием в секциях СПП разного диаметра и питанием всех секций последовательно от одного источника тока. Этим достигается более равномерная загрузка СПП и меньший его расход. Экономия СПП по сравнению с несекционированным соленоидом составляет 30%. Наличие лишь одного источника тока существенно облегчает получение стабильного однородного поля, а для получения режима "замороженного" магнитного поля при этом требуется лишь один сверхпроводящий ключ (СПК).

Основная обмотка СПС состоит из 3 секций, а корректирующие - из 2 секций каждая. Плотность тока в секциях предполагается равномерно распределенной по сечению, а коэффициент заполнения обмоток зависит от диаметра СПП, толщины изоляции, технологии намотки и определяется экспериментально.

С учетом зависимости критической плотности тока от магнитного поля для СПП типа СКНТЭ-60-05 разного диаметра

и распределения магнитного поля в обмотках СПС для внутренних секций (1,2,3) выбран СПП с ϕ 1 мм, для внешних (5,6,7) - ϕ 0,7 мм и для средней (4) - ϕ 0,85 мм в соответствии с размерами промышленных образцов СПП. При этом ток питания СПС превышает 150 А.

Непосредственно использовать результаты [1] при создании СМС оказалось невозможно, поскольку эти расчеты проведены без учета реальной структуры обмоток СПС и технологии намотки. Например, при выбранной технологии намотки число слоев в секциях 2,4,5 основной обмотки должно быть нечетным, а в секциях 1 и 3 корректирующих обмоток - четным. Как показывают расчеты, однородность поля в рабочем объеме весьма чувствительна к отклонениям геометрических размеров СПС. Так, погрешность в реализации ряда размеров СПС на уровне десятых мм может привести к ухудшению однородности поля более чем на порядок.

Поэтому потребовалось заново провести расчет обмоток СПС. При этом в размеры СПС по сравнению с [1] были внесены еще некоторые изменения, связанные с конструктивными соображениями, требованиями механической прочности и технологии намотки. После этого была проведена аналогично [1] оптимизация размеров a_5 , a_6 и b_3 (рис.1) корректирующих обмоток с целью получения максимальной однородности поля в области $z = \pm 25$ мм, $R \leq 25$ мм. В результате расчетная однородность поля в рабочей области оказалась приблизительно той же, что и в [1], и составила $|\Delta B/B_0| \leq 0,0002\%$.

При намотке основной обмотки СПС и внутренних секций 1 и 3 корректирующих обмоток эффективные сечения СПП во всех секциях получились меньше расчетных значений, взятых из [1], и коэффициент заполнения обмоток составил от 80 до 90%. В результате толщины секций при выбранном числе слоев оказались меньше расчетных, что должно было привести к существенному ухудшению однородности поля. С учетом реально полученных размеров была проведена дополнительная оптимизация размера a_6 для улучшения однородности поля. В результате окончательные размеры обмоток СПС получились следующими:

$$a_1 = 60 \text{ мм}, a_2 = 66,65 \text{ мм}, a_3 = 73,5 \text{ мм}, a_4 = 81,7 \text{ мм}, \\ a_5 = 70,25 \text{ мм}, a_6 = 97,64 \text{ мм}, b_1 = 321 \text{ мм}, b_2 = 6 \text{ мм}, b_3 = 40,5 \text{ мм}.$$

Хотя однородность поля в рабочей области при этих размерах, приведенная на рис.2, оказывается несколько хуже первоначально рассчитанной, она, тем не менее, лучше, чем 0,001%, а в сфере с диаметром 5 см составляет 0,0003%. Дополнительная практическая компенсация неоднородности поля из-за погрешностей изготовления СПС возможна и путем изменения числа витков во внешних слоях секций 6 и 7 корректирующих обмоток.

КОНСТРУКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СМС

При создании СМС для минимизации влияния конструктивных материалов на параметры магнитного поля в рабочем объеме необходимо учитывать их магнитные свойства, например, намагничиваемость. Условия работы элементов конструкции СМС разнообразны: диапазон температур - 4+300 К, магнитных полей - 0+5 Т. Также существенна форма некоторых элементов, находящихся вблизи или внутри рабочего объема.

Таблица

№ %/	Материал образца	M, мТ (чк)	M=f(B), B=0+5Т
1	Медь М1	-0,012	С 2Т насыщение
2	Винипласт	-0,022	Линейная
3	Оргстекло	-0,023	С 1,7Т насыщение
4	Фторопласт	-0,03	Линейная
5	Текстолит ПТК	0,013	С 3Т насыщение
6	Эбонит	0,12	Линейная
7	Дюраль А-16Т	0,24	Линейная
8	Стеклотекстолит КАСТ	0,78	Нелинейная
9	Титан ОТ-4	1,0	Линейная
10	Латунь ЛС-59Т	1,65	С 1Т насыщение
11	Нерж сталь 12*18Н9Т	62,0	Нелинейная

В этой связи были проведены измерения намагничиваемости М ряда конструктивных материалов при ~ 4,2 К в магнитных полях до ~ 5 Т на специальном стенде ^{15/}. Измеряемые образцы выполнялись в виде стержней с длиной 45 мм и диаметром 10 мм. В таблице приведены величины М образцов с указанием характера их зависимости от внешнего магнитного поля

В. При комнатной температуре величины намагничиваемости ниже указанных. Результаты этих измерений использованы при конструировании СМС.

КОНСТРУКЦИЯ СПС

Обмотки СПС (рис.1) намотаны на каркасе из дюрала, поверхности которого, соприкасающиеся с обмотками, электрически изолированы. Основная обмотка СПС отделена от корректирующих ребрами с общей толщиной 6 мм, в которых сделаны каналы для вывода концов обмоток-секций. Толщина стенки трубы каркаса составляет 4 мм, а внешних фланцев - 15 мм. Точности воспроизведения размеров каркаса при изготовлении лучше 0,1 мм.

Плотная намотка СПС осуществлялась на специально созданном для этого станке с натягом СПП от 7 до 12 кгс/мм², что соответствовало упругому удлинению проводов на ~ (0,3+0,4)%. Для междуслойной изоляции использовали один слой лавсановой пленки толщиной 50 мкм, а для межсекционной изоляции - прессшпан с наклеенной лавсановой пленкой с общей толщиной ~ 100 мкм. Технологические зазоры в обмотках уплотнялись нитками и заливались компаундом из канифоли и парафина.

Намотка секций СПС производилась последовательно согласно их порядковым номерам на рис.1 (обмотка 5 намотана из 2 кусков СПП). Конец каждой секции и начало следующей выводятся попарно в точках, равномерно распределенных по наружной окружности соответствующих ребер. Снаружи обмотки укреплены бандажом. Основная обмотка жата двумя слоями проволоки ϕ 1 мм из нержавеющей стали с натягом ~ 12 кгс, а корректирующие закреплены стягиваемыми полукольцами из дюрала.

Спайка каждой из пар выводов секций осуществлялась индием по медным матрицам на длине ~ 200 мм, а конечные части СПП длиной ~ 50 мм, очищенные травлением от медной матрицы, спаивались специальным припоем (53,5% Bi; 46,5% Pb) по сверхпроводниковым жилам с помощью ультразвукового паяльника. Спаи уложены в пазы и закреплены на опорных планках из текстолита, расположенных соответственно по образующим в области основной обмотки, где магнитное поле минимально.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СПС

На рис.3 представлена схема соединения секций СПС, подключения СПК и ввода тока питания СПС. Внешние токовводы выполнены в виде медных

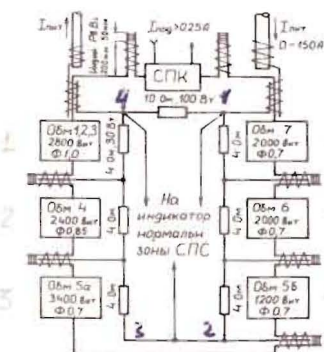


Рис.3. Электрическая схема соединений обмоток СПС, СПК и вводов тока питания.

(ϕ 10 и ϕ 18 мм) коаксиально расположенных труб (рис.4), нижние концы которых с помощью резьбового соединения закреплены в контактной конструкции, расположенной на верхнем фланце каркаса СПС. К этой конструкции по соответствующим спиральным канавкам подпаяны индием по медной матрице промежуточные токовые вводы (В1, В2) из СПП ϕ 1,0 мм. Другие концы В1 и В2 таким же образом подпаяны к внешним выводам обмотки СПС, к концам которых подпаяны вводы СПК, шунтирующего обмотку СПС. Подпайка СПК осуществлена как по меди, так и по сверхпроводнику, как и в случае соединений секций обмотки СПС. Обе группы спаев закреплены на опорной планке, расположенной в области малых полей вдоль образующей СПС вблизи контактной конструкции.

Все секции обмотки СПС шунтированы защитными сопротивлениями ~ 4 Ом, 30 Вт, а вход - сопротивлением ~ 10 Ом, 100 Вт для ограничения перенапряжений на обмотках при переходе запитанного током СПС

из сверхпроводящего в нормальное состояние. Сопротивления 4,0 Ом укреплены непосредственно на СПС, а 10 Ом смонтировано в области газообразного гелия на подвеске СПС.

Общее число витков обмотки СПС равно ~ 13800 , а индуктивность не превышает 9 Гн. Магнитное поле в рабочем объеме ~ 5 Т получается при токе питания 145,0 А.

Для детектирования момента появления нормальной зоны в обмотке СПС сделаны выводы от входных концов и приблизительно от средней точки обмотки СПС, которые совместно с внешними элементами образуют т.н. мостовой детектор. Сигнал с детектора используется в системе питания СМС для отключения внешнего тока и включения устройства эвакуации энергии из СПС (до ~ 90 кДж) ^{16/}.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ КЛЮЧ

Основой СПК является СПП ϕ 0,85 (СКНТЭ-60-0,5) длиной 10 м, очищенный травлением от медной матрицы на участках по 120 мм с интервалами по 15 мм. Общее сопротивление провода составляет ~ 23 Ом. Провод изолирован фторопластовой лентой толщиной 10 мкм. Четыре подогревателя из провода ПЭШОММ ϕ 0,25 мм намотаны бифилярно на крайние и на два средних очищенных участка провода. Подогреватели включены параллельно-последовательно и имеют общее входное сопротивление ~ 22 Ом. Провод с подогревателями обмотан ниткой, сложен вдвое и намотан на фторопластовую катушку (ϕ 50 мм, толщина 20 мм), которая с наружной стороны уплотняется. В щечках катушки сделаны несколько отверстий ϕ 1 мм для прохода гелия. СПК монтируется на вводной опорной планке в малых полях. Вводы СПК имеют длину ~ 25 см, из них 5 см очищены до сверхпроводника, а 20 см очищены от эмали до медной матрицы. Напряжение питания СПК более 5 В. Имелись варианты СПК с несколькими отличающимися параметрами.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ЭКРАН

Известна методика ^{13,4/} повышения однородности магнитного поля в СПС с помощью сверхпроводящего экрана (СПЭ). Цилиндрический СПЭ без короткозамкнутых контуров помещается внутрь СПС коаксиально с ним (рис.4).

Касательные к экрану составляющие изменяющегося магнитного поля не вызывают в экране наведенных токов и не искажаются, тогда как перпендикулярные составляющие возбуждают в СПЭ, согласно эффекту Мейснера, незатухающие токи, поля от которых компенсируют эти составляющие на поверхности экрана. В результате однородность поля внутри

экрана улучшается при условии, что перпендикулярные составляющие поля вблизи экрана относительно малы. По мере увеличения этих составляющих при удалении от центра СПС эффективность СПЭ уменьшается.

Для проверки этой методики улучшения однородности поля в СПС в данной конструкции предусмотрена возможность установки внутри СПС цилиндрического тонкостенного (~ 2 мм) каркаса из дюрала (ϕ 110 мм) с проточенным пазом шириной более 200 мм. На поверхности паза наматывается сверхпроводящая медная фольга из НТ-50 толщиной 20 мкм и числом слоев более 10. Намотка делается как с изоляцией между слоями конденсаторной бумагой, так и без нее. Согласно ^{14/}, такая конструкция СПЭ наиболее предпочтительна.

КОНСТРУКЦИЯ СМС

На рис.4 представлен упрощенный вид конструкции механической части СМС. Криостат СМС включает сосуд (1) из титана, в который помещены СПС (3), СПЭ (19) и заливается гелий (2). Кроме того, имеется сосуд (4) с жидким азотом (5), а также вакуумная камера с внешней обечайкой (6) из нержавеющей стали, которые обеспечивают тепловое экранирование гелиевого сосуда (1). Откачка из камеры (6) осуществляется через вентиль (7) до давления $\sim 10^{-4}$ Тор. СПС (3) и пенопластовый тепловой экран (14) крепятся на крышке (8) с помощью трех тяг (13), которыми можно корректировать положение СПС в криостате. В крышке (8) имеется предохранительный клапан (9) и гибкий сифон (10) для подачи жидкого гелия из сосуда Дьюара. В центре криостата и внутри СПС находится т.н. антикриостат (11,12), который обеспечивает тепловое экранирование между гелиевой ванной и рабочим объемом при комнатной температуре. Для минимизации влияния антикриостата (11,12) на магнитное поле в рабочем объеме СПС внутренняя труба (11) выполнена из титана, а между этой трубой и внутренней обечайкой гелиевого сосуда в вакуумном объеме располагается медный экран (12), который имеет тепловой контакт с азотным сосудом (5) и соответствующую температуру. Дно вакуумной камеры (6) с той же целью выполнено из титана. Внешние токовводы (15), состоящие из коаксиально расположенных и электрически изолированных двух медных труб, нижней частью крепятся в контактной конструкции (16) на каркасе СПС (3), на котором, кроме того, установлены опорные планки (17) для закрепления спаев обмоток СПС и СПК (18).

При работе СПС (3) стоит на дне гелиевого сосуда (1), а весь криостат располагается на подставке (20), верхняя плита (21) которой сделана из дюрала. Снизу к плите (21) крепится механизм (21) из дюрала для ввода и перемещения в рабочем объеме СМС пробников магнито-

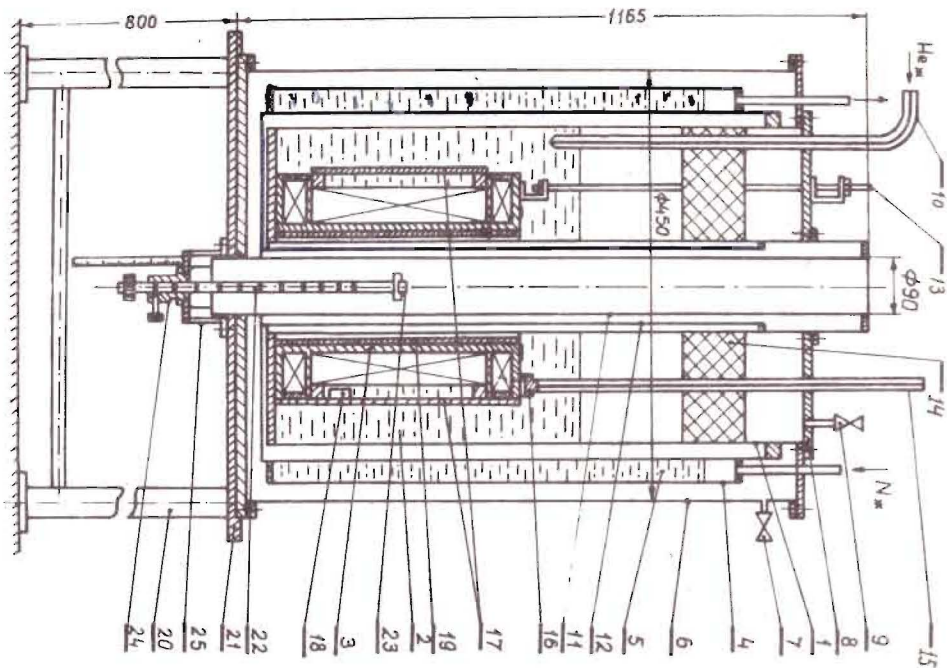


Рис.4. Упрощенный вид конструкции СМС.

метров, используемых как для измерения распределения поля в рабочем объеме, так и при калибровке магнитометров. Механизм перемещения состоит из цилиндрической штанги (22), на верхнем конце которой крепятся пробники (23). Нижняя часть штанги (22) фиксируется направляющей втулкой (24), которая укреплена на нижнем торце точеного стакана (25), закрепленного верхним фланцем к плате (21) соосно с СПС. Штанга (22) может перемещаться вдоль оси Z СПС и втулки (24) с фиксацией положений штанги через 5 мм подпружиненным шариком, входящим в соответствующие круговые проточки на штанге, в диапазоне по Z - +200 мм - 400 мм относительно центра рабочей области. Кроме того, штангу можно вращать вокруг ее оси Z . Точность установки штанги по оси - $\pm 0,1$ мм, по углу - $0,5^\circ$. Доступ к пробникам осуществляется через вырезанные в (22) проемы.

КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА СМС

Криосистема обеспечивает работу СПС в сверхпроводящем режиме и получение комнатной температуры в рабочем объеме СМС. В нее входят:

криостат с антикриостатом, которые, кроме того, должны обладать высокой прочностью с учетом больших перепадов температур и магнитного поля, система токовода СПС с охлаждением обратным потоком газообразного гелия, регулируемым ротаметром, системы вакуумной откачки с двумя цеолитовыми насосами. В криосистему также входят сифон для переливания жидкого гелия, сверхпроводящий измеритель уровня жидкого гелия, измерители низких температур с помощью угольных терморезисторов, газгольдер для сбора газообразного гелия, газовый пульт с органами управления газовой системой с манометрами и ротаметром, а также блок контроля и измерения с источником питания. Объем азотной ванны равен ~ 30 л, объем заливаемого до нормального уровня жидкого гелия - более 35 л.

На охлаждение СПС до 4,2 К, а также на последующую работу СМС в течение 4-5 часов необходимо 150 л жидкого азота и ~ 100 л жидкого гелия. При вакууме $\sim 10^{-4}$ Тор теплопритоки к криостату составляют ~ 2 Вт (~ 3 л/ч жидкого гелия).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания и наладка различных узлов и систем СМС проведены в процессе многочисленных криогенных заливок и запиток СПС от специального регулируемого стабилизатора тока с системой защиты. Измерения параметров магнитного поля проводились в основном с помощью холловского магнитометра с повышенной разрешающей способностью ^{16/}.

Результаты наладочных работ и экспериментов на СМС, а также его окончательные параметры будут рассмотрены отдельно.

Авторы признательны за внимание и поддержку в осуществлении настоящей работы В.А.Свиридову, а также А.И.Агееву, А.Б.Кузнецову, В.П.Филиппову, Н.Ф.Замолуеву, С.Е.Сухову, А.А.Пономареву, В.И.Клементьеву, А.М.Старикову и другим сотрудникам НЭОУС, НЭЯФ, ООЭИ и ЭМО ОНМУ за участие в этой работе на разных ее этапах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зиновьева Л.Л., Кабат Д., Лачинов В.М. СИЯИ, 8-10066, Дубна, 1976; *Elektr. čas.*, 28, 68, 564, 1977.
2. Сухой В.В., Пермяков В.В. и др. Оптимальные однородные соленоиды шестого порядка с наружным пазом. В кн.: "Вопросы атомной науки и техники. Серия - Фундаментальная и прикладная сверхпроводимость". Вып. I(4), Харьков, ХФТИ АН УССР, 1976, с.50-52.
3. Лазарев Б.Г., Лазарева Л.С., Полтавец В.А. О получении однородного постоянного поля в сверхпроводящих соленоидных при помощи

экрана из сверхпроводника с высокими параметрами. ДАН СССР, 1972, с.203, 810.

4. Бычков Ю.Ф., Тарутин О.Б., Узлов В.Ю. О применении сверхпроводящих экранов для повышения однородности магнитного поля в соленоидах. ПТЭ, 1974, №5, с.179.
5. Kokavec J., Cesnak L., Butvin P. Elektrotechnický obzor, 1978, 67, №8, 471.
6. Ахманова Л.Н., Лачинов В.М., Маковеев В.К., Стариков А.М. ОИЯИ, Р13-82-912, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 июля 1985 года.

В Объединенном институте ядерных исследований начал выходить сборник "*Краткие сообщения ОИЯИ*". В нем будут помещаться статьи, содержащие оригинальные научные, научно-технические, методические и прикладные результаты, требующие срочной публикации. Будучи частью "*Сообщений ОИЯИ*", статьи, вошедшие в сборник, имеют, как и другие издания ОИЯИ, статус официальных публикаций.

Сборник "*Краткие сообщения ОИЯИ*" будет выходить регулярно.

The Joint Institute for Nuclear Research begins publishing a collection of papers entitled *JINR Rapid Communications* which is a section of the *JINR Communications* and is intended for the accelerated publication of important results on the following subjects:

- Physics of elementary particles and atomic nuclei.
- Theoretical physics.
- Experimental techniques and methods.
- Accelerators.
- Cryogenics.
- Computing mathematics and methods.
- Solid state physics. Liquids.
- Theory of condensed matter.
- Applied researches.

Being a part of the *JINR Communications*, the articles of new collection like all other publications of the Joint Institute for Nuclear Research have the status of official publications.

JINR Rapid Communications will be issued regularly.

