

СЗ45еу
М-152

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13 - 5443

Л.Г. Макаров

**РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ И ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
СОЛЕНОИДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛЬНЫХ
ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Специальность 260 - Приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Дубна 1970

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
В.И. Данилов,
доктор физико-математических наук, профессор М.И. Соловьев.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт физики высоких энергий.

Автореферат разослан 1970 года
Защита диссертации состоится 1970 года
на заседании Ученого совета Лаборатории высоких энергий.

Адрес: г. Дубна, Московской области, ОИЯИ, конференц-зал
Лаборатории высоких энергий.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ.

Учёный секретарь Совета

С.В. Мухин

Л.Г. Макаров

**РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ И ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ
СОЛЕНОИДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СИЛЬНЫХ
ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

Специальность 260 - Приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

452369

Прогресс науки тесно связан с использованием сильных магнитных полей.

В экспериментах по изучению ядерных взаимодействий магнитное поле имеет универсальное применение. Оно используется для формирования, поворота и анализа пучков заряженных частиц. С его помощью определяются такие фундаментальные характеристики ядерных частиц, как знак заряда частицы, ее импульс и др.

В кольцевых ускорителях заряженных частиц магнитное поле является основным средством, удерживающим заряженные частицы на орбите во время ускорения. Эксперименты в физике элементарных частиц развиваются в направлении увеличения энергии взаимодействия частиц и увеличения интенсивности пучков заряженных частиц. Такое стремление обязывает развивать устройства для получения магнитных полей максимальной напряженности в больших объемах. Магнитные поля также находят широкое применение в различных технологических процессах в промышленности.

В диссертации предпринята попытка обобщить материалы по разработке установки для получения сильных импульсных магнитных полей. В данном случае под установкой подразумеваются следующие устройства:

а) Устройство, в котором генерируется поле высокой напряженности - рабочий орган - высоковольтные соленоиды.

б) Система питания высоковольтных соленоидов импульсным током высокого напряжения.

в) Система отвода тепла от высоковольтных соленоидов.⁴
Кроме того, рассмотрены вопросы:

а) Методика измерения напряженности импульсных магнитных полей в 150 + 200 кэ;

б) Использование высоковольтных соленоидов в физических экспериментах в ОИЯИ.

Частично использованы материалы опыта наладки, испытаний и эксплуатации установки с сильным магнитным полем.

Диссертация состоит из пяти глав. Первая глава (Введение) посвящена классификации магнитных полей и устройств для их получения.

Общепризнанной классификации магнитных полей в настоящее время не имеется. Наиболее рационально провести ее по следующим определениям:

- а) Вид магнитного поля,
- б) Величина напряженности, объем и однородность магнитного поля и длительность импульса.
- в) Способы получения магнитных полей.

Предполагаемая в таблице 1 классификация магнитных полей представляет попытку обобщить имеющийся опыт по технике и физике магнитных полей, исходя из величины напряженности магнитного поля.

Таблица 1

№№ пп	Название класса магнитного поля	Величина напряженности магнитного поля в кэ
1	Промполя	до 30
2	Средние поля	от 30 до 100
3	Сильные поля	от 100 до 250
4	Сверхсильные поля	от 250 до 1000
5	Суперполя	от 1000 и выше

Название классов полей в таблице 1 носит условный характер. Напряженность, объем поля, однородность его и длительность импульса – это те характеристики, которые дают возможность определенно судить о поле и установке, а также о возможности использования этой установки для практических целей.

Классификация по способу получения магнитных полей отражает принципиальные различия рабочих органов установки. Такое разделение установок можно провести следующим образом:

- а) Соленоиды (в том числе и высоковольтные).
- б) Электромагниты.
- в) Соленоиды, обмотки которых работают при низких температурах.
- г) Соленоиды со сверхпроводящими обмотками.
- д) Устройства для получения магнитных полей методом взрыва и магнитного обжатия.

В первой главе дан также краткий обзор развития устройств (соленоидов) для получения сильных магнитных полей, известных в литературе и близких по техническим характеристикам к описанным в диссертации. В этой же главе приведены основные характеристики магнитов и магнитных линий, используемых в ЛВЭ ОИЯИ.

Во второй главе подробно рассмотрены вопросы разработки с математическим обоснованием, технология изготовления и основные характеристики четырех моделей высоковольтных соленоидов^{1/}. Приведенные схемы их расчёта в большинстве своем даны в сравнении с зазорами тех или иных величин на конкретных соленоидах.

Три модели соленоидов (I , III и IV) конструировались по заранее заданным условиям в части напряженности поля, объема его, однородности, длительности и частоты импульсов магнитного поля. Для получения сильных магнитных полей в больших объемах и большой длительности наиболее перспективными являются высоковольтные соленоиды, состоящие из нескольких сот витков. Сравнительно высокая индуктивность позволяет иметь соответственно и длительность магнитного импульса.

Использование при изготовлении высоковольтных соленоидов таких изоляционных материалов как эпоксидные смолы и стеклотенты позволяет прикладывать к соленоидам высокое напряжение и обеспечивает их механическую прочность. Наиболее оптимальным рабочим напряжением для высоковольтных соленоидов является напряжение 15 + 20 кв.

Основные характеристики двухобмоточных четырех моделей высоковольтных соленоидов приведены в таблице 2.

Таблица 2

№№ пп	Наименование характеристик, единицы измерения	Модель соленоида			
		I	II	III	IV
1	Наружный диаметр, мм	180	126	300	430
2	Внутренний диаметр, мм	30	50	80	80
3	Общая длина, мм	110	217	222	206
4	Отверстия для пучка (высота x ширина), мм	8x30	15x50	20x80	70x110 (эллипс)
5	Число витков в соленоиде	210	890	792	800
6	Прикладываемое напряжение, кв	10	15	18,5	15
7	Амплитуда тока, кА	10	4,5	3,7	2,8
8	Максимальная плотность тока, а/мм ²	483	964	178	135
9	Максимальная напряженность магнитного поля, кэ	230	200	134	85
10	Напряженность поля в центре рабочей зоны, кэ	214	170	130	74
11	Длительность импульса магнит- ного поля, мсек	6,25	18	28	36
12	Допустимое количество импуль- сов за 1 час при водяном охлаждении	126	28	86	125
13	Вес соленоида в сборе, кг	17	15	110	125

В третьей главе изложены вопросы, относящиеся к системе питания высоковольтных соленоидов. После тщательного анализа технических требований был выбран вариант системы питания, состоящий из зарядной станции и конденсаторной батареи^{1/2/}.

На рис. 1 приведена блок-схема системы питания высоковольтных соленоидов.

Конструктивно система питания состоит из следующих узлов:

- а) импульсный высоковольтный трехфазный трансформатор (ИВТТ);
- б) зарядный выпрямитель;
- в) накопительная емкость;
- г) разрядный игнитрон со стойкой поджига;
- д) панель управления.

Импульсный высоковольтный трехфазный трансформатор специально сконструирован и изготовлен как малогабаритный электротехнический аппарат, способный работать со вторичным линейным напряжением до 14,27 кв при номинальной мощности ~ 15 кВА^{1/4/}. Трансформатор предназначен для питания зарядного выпрямителя от сети 380 в. Зарядный выпрямитель заряжает конденсаторную емкость в 2100 мкф до напряжения 15 + 17 кв. Он собран на тиратронных управляемых выпрямителях (тип ТР-1-6/15) по трехфазной типовой мостовой схеме. В схеме управления используются тиратроны типа ТГ-1-2,5/ч. В качестве задающего генератора импульсов управления в этом устройстве служат три пика трансформатора, которые запитываются от фазорегулятора.

Накопительная емкость (2100 мкф) собрана из конденсаторов типа ИМ 3/100 и ИМ 5/150.

Для коммутирования тока высокого напряжения используется игнитрон типа ИВС-100/15.

Управление и контроль за работой высоковольтных соленоидов и за системой питания осуществляется со специально сконструированной и изготовленной панели управления. Рисунки 2,3, 4 и 5 характеризуют систему питания высоковольтных соленоидов.

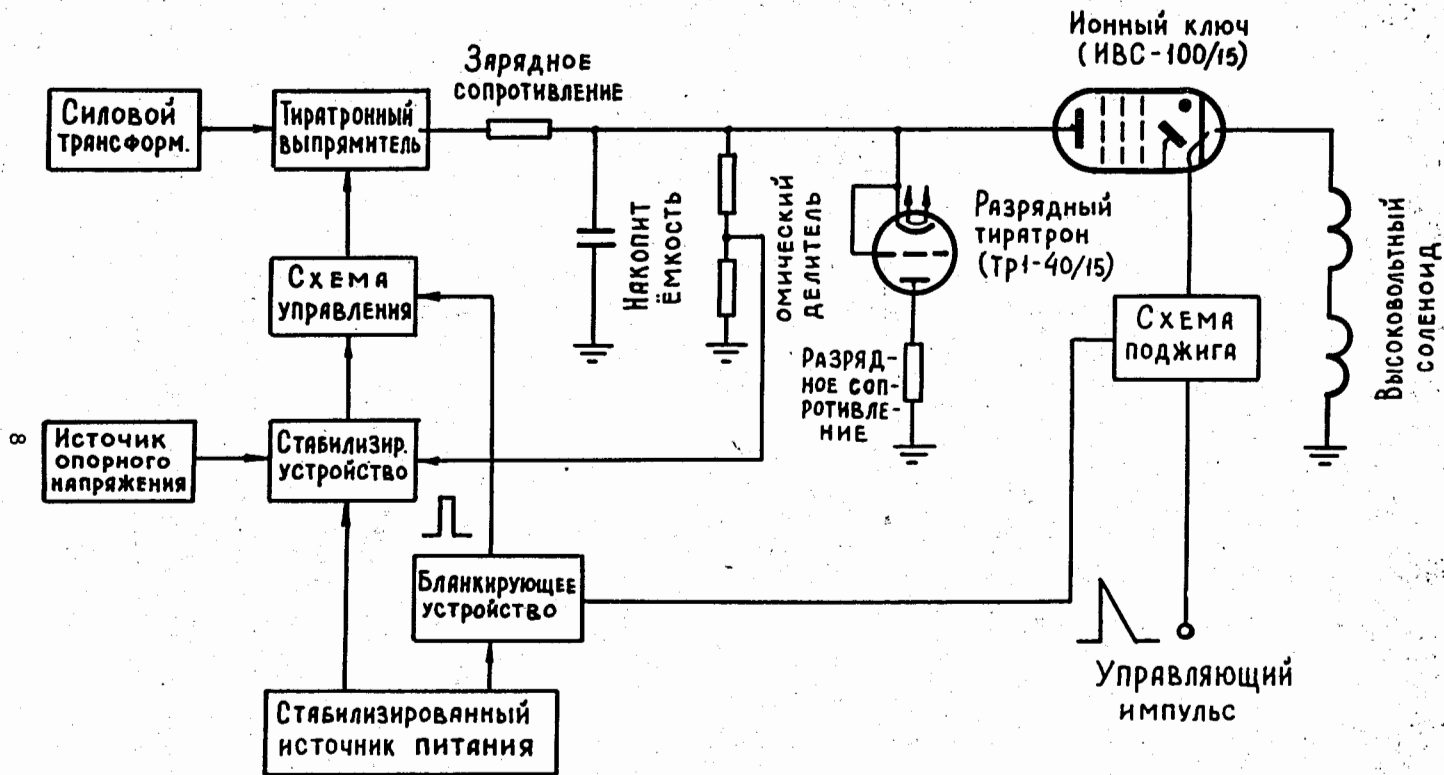


Рис. 1. Блок-схема системы питания в высоковольтных соленоидных.

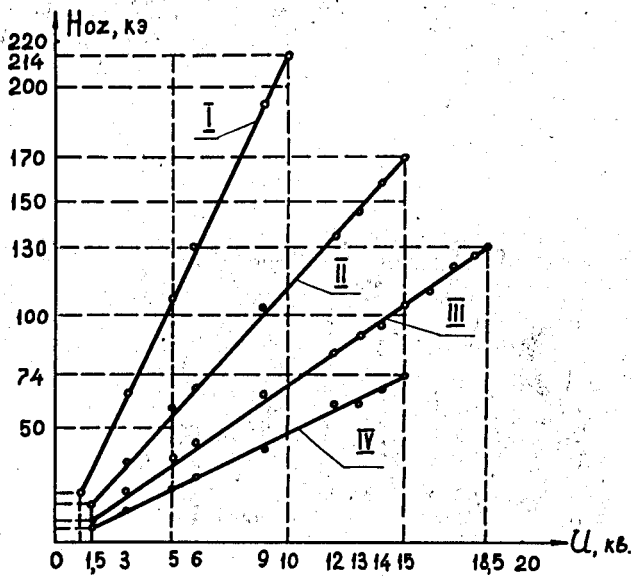


Рис. 2. Зависимость величины напряженности магнитного поля (в центре рабочей зоны) для высоковольтных соленоидов от приложенного напряжения.

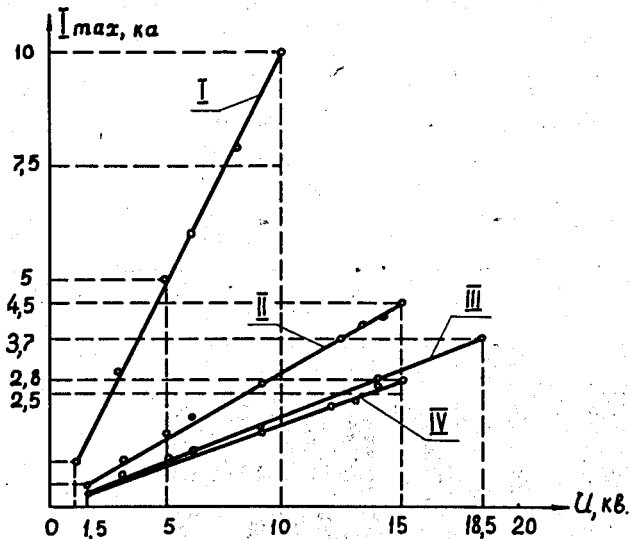


Рис. 3. Зависимость величины амплитуды тока I_{max} для высоковольтных соленоидов от приложенного напряжения.

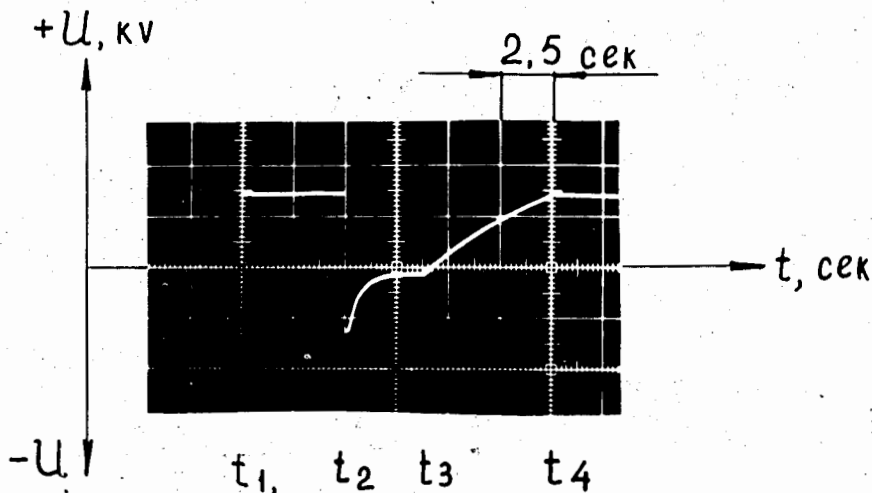


Рис. 4. Кривая изменения напряжения на накопительной емкости. $t_1 - t_2$ - интервал времени, в течение которого напряжение на накопительной емкости поддерживается стабилизирующим устройством на уровне 0,1%; t_2 - момент времени разряда накопительной емкости на высоковольтный соленоид, $t_2 - t_3$ - интервал времени, в течение которого перезарядившаяся емкость через разрядный тиратрон разряжается на землю; $t_3 - t_4$ - интервал времени, в котором накопительная емкость заряжается до рабочего напряжения.

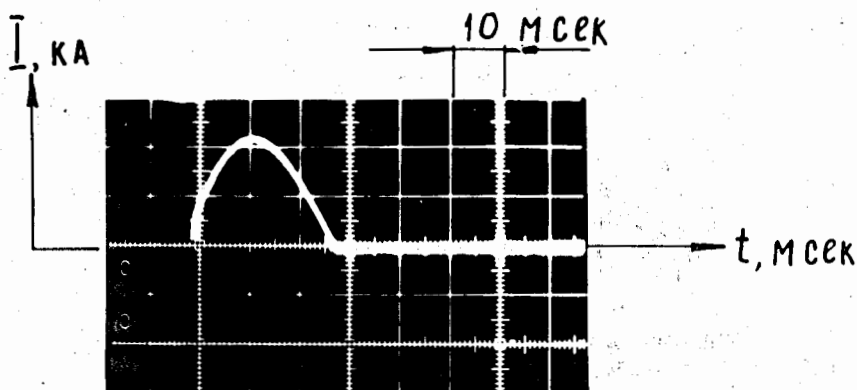


Рис. 5. Кривая изменения разрядного тока в высоковольтном соленоиде модели IV.

В четвертой главе разбираются вопросы отвода тепла от высоковольтных соленоидов /3/. В этой главе изложены результаты тепловых испытаний, которые были проведены на рабочих высоковольтных соленоидах. Все четыре модели соленоидов испытывались при охлаждении их проточной дистиллированной водой.

Соленоид модели III проходил тепловые испытания по следующей (широкой) программе: обдувался воздухом, омывался водой и охлаждался жидким азотом.

Если эффективность охлаждения проточной водой принять за единицу, то эффективность охлаждения при других видах распределится следующим образом: охлаждение воздухом без обдувания - 0,12, с обдуванием - 0,53, охлаждение жидким азотом - 4,98.

Наиболее простой и дешевый вид охлаждения - обдувание воздухом.

Наиболее эффективное охлаждение - охлаждение жидким азотом. Однако в выполнении такого варианта охлаждения имеются технические трудности.

Для постоянной работы высоковольтных соленоидов принят оптимальный вариант охлаждения для наших условий - водяное охлаждение. При таком виде охлаждения допустимое количество импульсов магнитного поля за 1 час по моделям соленоидов следующее: модель I - 126, модель II - 28, модель III - 86, модель IV - 125.

В пятой главе изложены материалы по использованию высоковольтных соленоидов в физических экспериментах и методика измерения напряженности сильных магнитных полей.

Высоковольтный соленоид модели IV был использован и продолжает использоваться совместно с установкой "СКИФ" в эксперименте по поиску возможного эффекта регенерации $K_L^0 + K_S^0$ - мезонов в магнитном поле.

В поле соленоида модели III фотоэмульсии облучались протонами 5 Гэв. В поле соленоида модели I эмульсия облучалась пучком дейтонов. Один экземпляр соленоида модели I передан в нейтронную лабораторию ОИЯИ, где он монтируется в пучке нейтронов.

Для измерения величины напряженности магнитного поля, генерируемого в высоковольтных соленоидах, использовались датчики Холла советского и чехословацкого производства, а также измерительные катушки, которые были специально сконструированы и изготовлены для этой цели. Датчики Холла, отградуированные в "эталонном поле", обеспечили измерение в полях 150 ± 200 кэ с точностью $\pm 1\%$ (точность, пригодная для практических целей) без термостатирования.

Измерительные катушки широкого применения не нашли и использовались как второй независимый путь измерения напряженности магнитного поля.

Основные результаты работ, на основе которых написана диссертация:

1. Создана установка для получения импульсных сильных магнитных полей с группой (4 модели) высоковольтных соленоидов (см. рис. 6 и 7).

2. Разработана технология изготовления, методика испытаний и отработаны технические характеристики для высоковольтных многовитковых двухкатушечных соленоидов.

3. Получено максимальное импульсное магнитное поле в соленоиде модели I - 230 кэ. Обобщенный объем высокого поля - 0,077 л. Длительность импульса - 6,25 мсек.

В соленоиде модели III, с обобщенным объемом поля 1,115 л, получена напряженность поля 134 кэ с длительностью импульса 18 мсек.

4. Разработана, изготовлена и испытана система питания, которая может питать высоковольтные соленоиды импульсным током на напряжение до 20 кв.

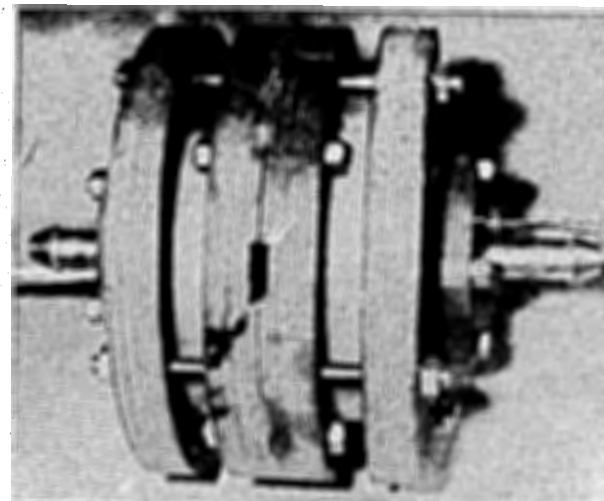


Рис. 6. Общий вид высоковольтного соленоида модели I .

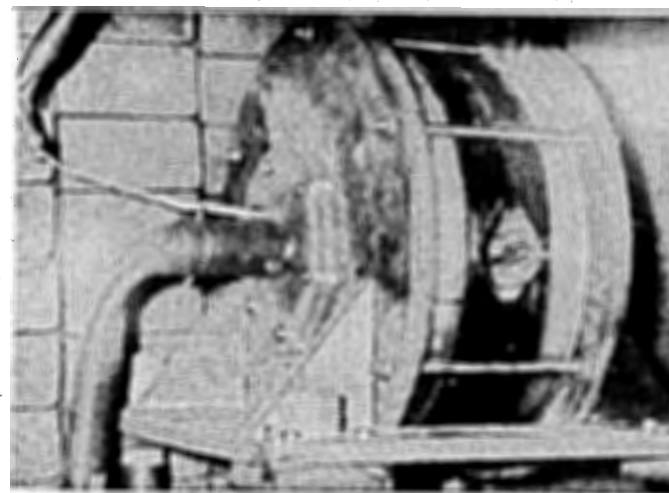


Рис. 7. Общий вид высоковольтного соленоида модели IV .

5. Сконструирован, изготовлен и испытан малогабаритный высоковольтный трансформатор (ИВТТ) в качестве удобного источника питания зарядовой станции от сети в 380 в.

6. Проведены тепловые испытания на рабочих образцах высоковольтных соленоидов.

Результаты тепловых испытаний дают практическое руководство для выбора вида охлаждения и тепловых режимов высоковольтных соленоидов при их эксплуатации.

7. Разработана и опробована методика измерения напряженности полей 150 + 200 кэ с помощью датчиков Холла и измерительных катушек с точностью замера $\pm 1\%$.

8. Практически доказаны возможность и преимущества использования изоляционных материалов эпоксида и стеклоленты при изготовлении высоковольтных соленоидов. Указанные материалы, кроме того, что они выдерживают рабочее напряжение до 20 кв., удовлетворительно работают при механических ударных нагрузках.

9. Подтверждено, что для получения сильных импульсных магнитных полей в сравнительно больших объемах наиболее рационально конструировать и изготавливать многовитковые соленоиды, которые питаются током высокого напряжения. Сравнительно большая индуктивность высоковольтных соленоидов позволяет до минимума свести паразитные влияния индуктивных линий и других элементов установки. Канализация электроэнергии на высоком напряжении к месту генерирования магнитного поля значительно увеличивает к.п.д. системы питания.

Кроме того, многовитковые соленоиды, выполненные в виде монолита со стеклоэпоксидными бандажами, успешно справляются с механическими нагрузками, возникающими в соленоидах от взаимодействия тока и магнитного поля.

Л и т е р а т у р а

1. Л.Г. Макаров. Препринт ОИЯИ, 13-4186, Дубна, 1968.
2. Л.Г. Макаров, А.А. Смирнов. Препринт ОИЯИ, 13-4187, Дубна, 1968.
3. Л.Г. Макаров. Сообщение ОИЯИ. 13-4582, Дубна, 1969.
4. Л.Г. Макаров. Сообщение ОИЯИ, 13-4583, Дубна, 1969.
5. П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. Расчет индуктивностей, ГЭИ, 1955.
6. В.В. Михайлов. Расчет и конструирование высоковольтной аппаратуры. ГЭИ, 1955.
7. П.М. Тихомиров. Расчет трансформаторов, ГЭИ, 1953.
8. В.Р. Карасик. Физика и техника сильных магнитных полей. Изд. "Наука", 1964.
9. К.И. Черник. Эпоксидные компаунды и их применение. Судпромгиз, 1959.
10. Н.И. Бачурин. Литая изоляция высокого напряжения, ГЭИ, 1963.
11. В.Т. Рене. Электрические конденсаторы. ГЭИ, 1959.
12. И.Л. Каганов. Электронные и ионные преобразователи, часть III, ГЭИ, 1956.
13. К.А. Андрианов, М.Б. Богородицкий, Ю.В. Корецкий и Б.М. Тареев. Справочник по электротехническим материалам. Том I, ГЭИ, 1968 и том II, ГЭИ, 1960.
14. К.А. Круг. Основы электротехники. ОНТИ-НКТП, 1936.
15. К.А. Круг. Основы электротехники. Том I и том II. Госэнергоиздат, 1946.
16. Л.А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. "Высшая школа", 1962.
17. А.А. Воробьев. Высоковольтное испытательное оборудование. ГЭИ, 1960.
18. А.Р. Голован, П.Г. Грудинский, Г.Н. Петров, А.М. Федосеев, М.Г. Чиликин. Электротехнический справочник, ГЭИ, 1952.
19. Е.Г. Комар. Ускорители заряженных частиц. Атомиздат, 1964.

20. М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков.
Справочник по физико-техническим основам глубокого холода.
ГЭИ, 1963.
21. И.Н. Гончаров. (ПТЭ №2, 1967, стр. 236).
22. Б.Г. Лазарев, Л.С. Лазарева, В.Р. Голик, С.И. Горядов. Сверх-
проводящий лабораторный соленоид на 112 кэ из проволоки
из деформированных сплавов. ДАН СССР, т. 184, №1 с 89-90,
1969.
23. Н.Г. Анищенко, В.А. Васильев, В.Я. Волков, А.Г. Зельдович
и др. Препринт ОИЯИ 8-4882, Дубна, 1969.
24. М.Х. Аникина, Л.С. Барабаш, А.Г. Грачев и др. Препринт ОИЯИ,
1-3050, Дубна, 1966.
25. Б.Д. Омельченко. Препринт ОИЯИ, 13-4222, Дубна, 1969.
26. М.Х. Аникина, Л.С. Барабаш, И.А. Голутвин и др. Препринт
ОИЯИ, 13-4123, Дубна, 1968.
27. Л.С. Барабаш, А.Г. Грачев, Л.В. Комогорова и др. ПТЭ №4,
1969, стр. 66.

Рукопись поступила в издательский отдел

3 ноября 1970 года.