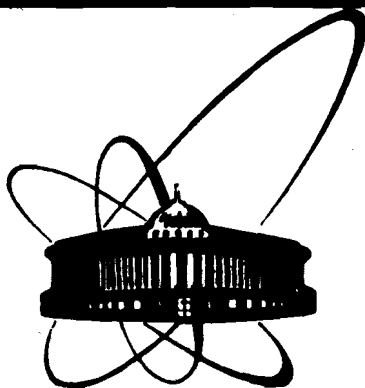


89-467



**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

Д 938

9-89-467

Е.И.Дьячков, Г.Л.Кузнецов, А.А.Смирнов,  
В.И.Смирнов \*, Г.Г.Ходжибагиян

**К ВОПРОСУ ОБ ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ  
ИЗ МАГНИТОВ НУКЛОТРОНА**

---

\* Московский инженерно-физический институт

**1989**

## ВВЕДЕНИЕ

Работа выполнена в рамках проекта по созданию в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ сверхпроводящего ускорителя — нуклотрона<sup>1, 2</sup> и посвящена вопросу защиты сверхпроводящих (СП) магнитов от повреждений при их переходах в нормальное состояние. Переход СП-обмотки магнита в нормальное состояние может быть вызван ухудшением условий криостатирования, превышением допустимого значения тока в обмотке, локальным нагревом обмотки из-за радиационных потерь и т.п. При этом в СП-обмотке возникает участок с активным сопротивлением, на котором выделяется в виде джоулева тепла энергия, запасенная в магнитном поле. С целью предотвращения перегрева и повреждения СП-обмотки обычно применяют метод защиты<sup>3, 4</sup>, позволяющий вывести из криостата большую часть запасенной магнитом энергии.

На рис. 1 приведены электрические схемы основных способов защиты СП-магнитов. Приняв допустимое (по условиям электрической прочности изоляции) напряжение на тоководах дипольных магнитов нуклотрона  $U = 2$  кВ и число последовательно включенных магнитов, питающихся от одной пары тоководов,  $n = 48$ , мож-

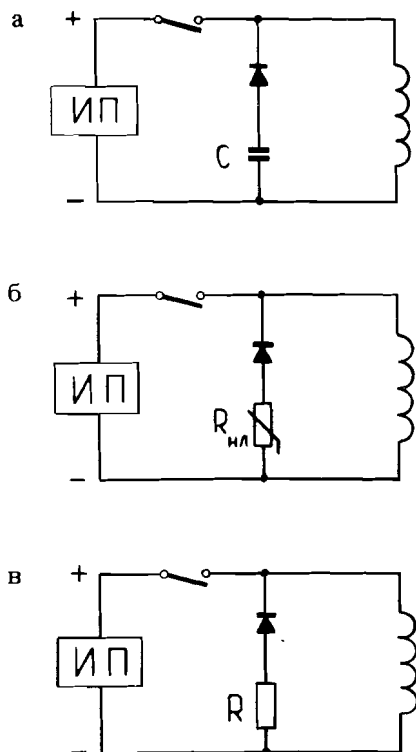


Рис. 1. Электрические схемы способов защиты СП-магнитов: а) эвакуация запасенной энергии на конденсатор; б) эвакуация энергии на нелинейное сопротивление при постоянном напряжении на тоководах; в) эвакуация энергии на постоянное сопротивление.

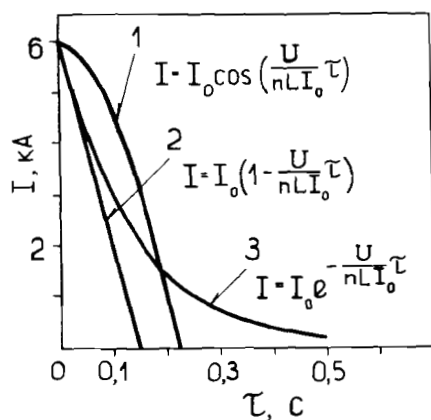


Рис. 2. Значение тока в магнитах нуклотрона в зависимости от времени с момента начала эвакуации энергии: 1 – на конденсатор; 2 – на нелинейное сопротивление; 3 – на постоянное сопротивление.

но определить значение тока в магнитах в зависимости от времени для различных схем эвакуации энергии (см. рис. 2).

В приведенных на рис. 2 формулах  $I_0 = 6 \cdot 10^3$  А – значение рабочего тока в магнитах;  $L = 1,1 \cdot 10^{-3}$  Гн – индуктивность одного магнита.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование процесса эвакуации энергии из трубчатого СП-магнита<sup>15</sup> на внешнее постоянное сопротивление (наиболее распространенный способ защиты) и выработка рекомендаций по системе защиты магнитов нуклотрона. При этом были определены скорость распространения нормальной зоны в обмотке, количество выделившегося в ней тепла и максимальная температура нагрева обмотки в результате перехода магнита из сверхпроводящего состояния в нормальное.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследование проводилось на полномасштабном дипольном магните нуклотрона, основные параметры которого приведены в таблице. Схема эксперимента приведена на рис. 3. В центре прямолинейного участка одного из витков внутреннего слоя обмотки на длине 80 мм с поверхности кабеля была удалена изоляция и размещен нагреватель. Методика измерения скорости распространения нормальной зоны в обмотке аналогична описанной в<sup>16</sup>.

Предварительно заряженный конденсатор с помощью тиристора подключался к нагревателю и разряжался на нем. От теплового импульса нагревателя зарождалась нормальная зона, которая распространялась вдоль кабеля. По обе стороны от нагревателя на определенном расстоянии располагались потенциальные отводы. Измерялся интервал времени, необходимый для преодоления фронтом нормальной зоны расстояния между соседними потенциальными отводами. Скорость распространения нормальной зоны по направлению прокатки

Таблица. Основные параметры магнита

Апертура, мм <sup>2</sup>	112x56
Длина "холодного" железного яра, мм	1370
Число витков в обмотке	16
Индуктивность, мГн	1,1
Длина трубчатого кабеля в обмотке, м	62
Диаметр канала для прокатки двухфазного гелия в кабеле, мм	4
Наружный диаметр мельхиоровой трубки кабеля, мм	5
Число СП-проводов $\phi$ 0,5 мм, навитых на трубку кабеля	31
СП-сплав	Nb-Ti (HT-50)
Отношение сечений меди и сверхпроводника	1,39
Число СП-волокон $\phi$ 10 мкм в проводе	1045
Внешний диаметр кабеля с изоляцией, мм	7
Критический ток при температуре 4,35 К, А	8190
Магнитное поле в апертуре при токе 6000 А, Тл	2,06

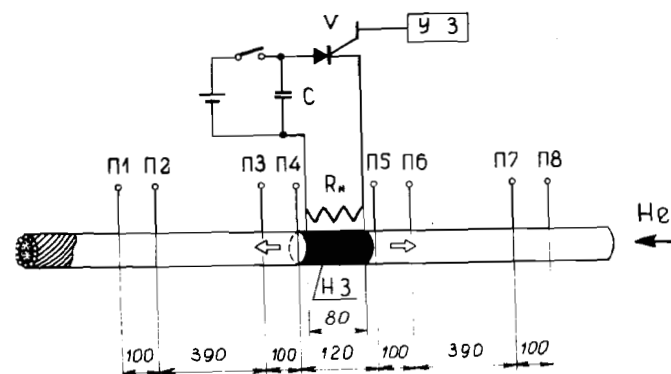


Рис. 3. Схема эксперимента: УЗ – устройство запуска; НЗ – нормальная зона; V – тиристор;  $R_n$  – нагреватель; C – емкость; П1-П8 – потенциальные отводы.

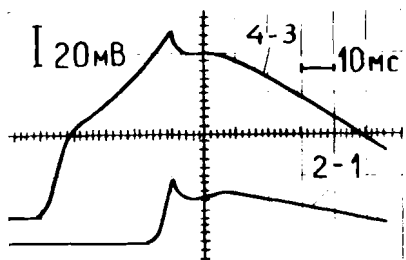
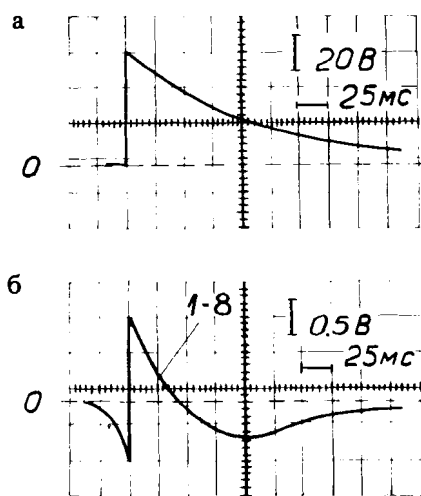


Рис. 4. Осциллограммы напряжений на потенциальных отводах П2 — П1 и П4 — П3 при переходе.  $I_0 = 5$  кА.

Рис. 5. Осциллограммы напряжений на внешнем сопротивлении (а) и потенциальных отводах П1 — П8 (б) при переходе.  $I_0 = 6$  кА.



гелия определялась по запаздыванию сигналов между парами потенциальных отводов П4 — П3, П2 — П1, а против направления прокачки гелия в трубке кабеля — между парами П5 — П6 и П7 — П8. Осциллограммы напряжений на парах П2 — П1 и П4 — П3 приведены на рис. 4. Первый и второй изгиб на осциллограмме 4-3 обусловлен соответственно переходом фронта нормальной зоны через точки П4 и П3, дальнейший рост напряжения происходит из-за увеличения сопротивления меди вследствие разогрева. Пик на осциллограмме соответствует моменту отключения источника и срабатыванию системы эвакуации энергии.

Скорость распространения нормальной зоны в обмотке диполя (с точностью 10%) не зависела от направления прокачки гелия и составила для значений тока в обмотке 3, 5 и 6 кА соответственно 10, 15 и 20 м/с.

Для измерения энергии, выделенной в обмотке при эвакуации на постоянное внешнее сопротивление, были сняты осциллограммы напряжений (см. рис. 5) на внешнем сопротивлении и потенциальных отводах П1 — П8, расстояние между которыми таково, что нормальная зона не успевает пройти его за время эвакуации энергии. Зависимость от времени активной составляющей напряжения нормальной зоны получена после вычитания из осциллограммы 1-8 (см. рис. 5б)

индуктивной составляющей ( $-L \frac{dI}{dt}$ ), она приведена на рис. 6. Сопро-

Рис. 6. Зависимость активного напряжения нормальной зоны от времени.  $I_0 = 6$  кА.

тивление нормальной зоны много меньше ( $\leq 3\%$ ) внешнего сопротивления ( $R = 0,01$  Ом). Поэтому можно считать, что форма изменения тока в обмотке такая же, как на рис. 5а.

Зная зависимость напряжения и тока от времени, можно получить временную зависимость мощности, выделяющейся в нормальной зоне (см. рис. 7). Проинтегрировав по времени эту кривую, получим энергию, выделившуюся в обмотке при переходе. Она составляет около 750 Дж или  $\sim 4\%$  от запасенной энергии, то есть эффективность вывода достигает 96%.

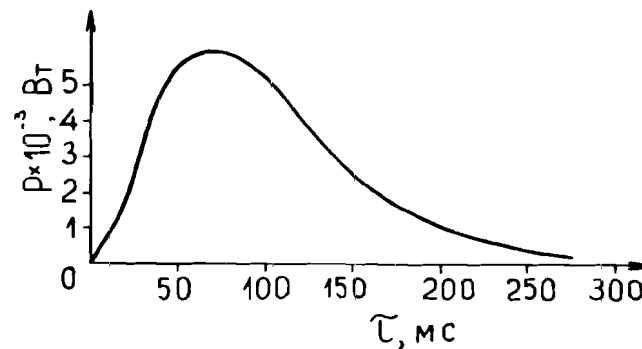
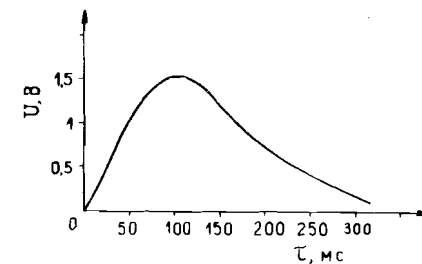


Рис. 7. Зависимость мощности, выделяющейся в нормальной зоне, от времени с момента ее зарождения.  $I_0 = 6$  кА,  $R = 0,01$  Ом.

Третьим этапом измерений была оценка максимальной температуры в обмотке при выделении всей запасенной магнитом энергии (20 кДж) в нормальной зоне путем замыкания тоководов магнита в момент его перехода, инициированного нагревателем (см. рис. 3). Измерялось напряжение на потенциальных отводах П5 — П4 (участок, на котором зарождается нормальная зона и температура обмотки при переходе имеет максимальное значение) при одновременном измерении тока в магните с помощью шунта. Вычитая индуктивную составляющую из  $U_{4-5}$  (рис. 8а) и зная временную зависимость тока в обмотке (рис. 8б), легко получить зависимость электрического сопротивления участка кабеля между точками П4 и П5 (см. рис. 3) от времени.

Используя полученную зависимость, а также зависимость электрического сопротивления единицы длины кабеля обмотки от температуры (см. рис. 9), можно найти зависимость температуры участка 4-5 от времени (см. рис. 10).



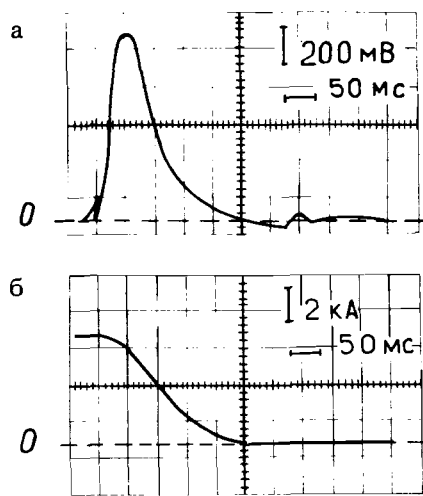


Рис. 8. Осциллограммы напряжений на потенциальных отводах П4–П5 (а) и шунте для измерения тока в обмотке (б).  $I_0 = 6$  кА,  $R = 0$ .

Рис. 10. Зависимость максимальной температуры разогрева обмотки от времени с момента перехода.  $I_0 = 6$  кА,  $R = 0$ .

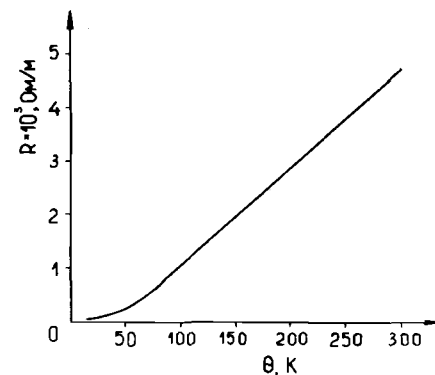
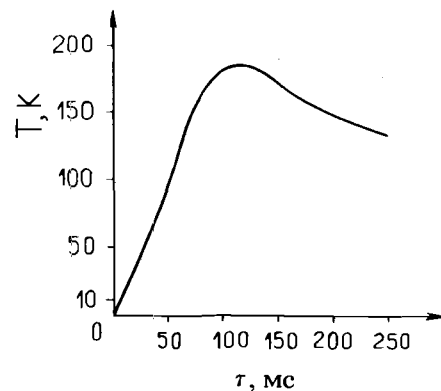


Рис. 9. Зависимость электрического сопротивления единицы длины кабеля обмотки от температуры.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Балдин А.М. и др. – В кн.: Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1975, т. II, с. 4.
2. Baldin A.M. et al. – IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983, vol. NS-30, No. 4, p. 3247.
3. Альтов В.А. и др. – Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем. М.: Энергия, 1975.
4. Уилсон М. – Сверхпроводящие магниты. М.: Мир, 1985.
5. Смирнов А.А. и др. – Препринт ОИЯИ 9-83-625, Дубна, 1983; J. de Physique, 1984, Colloque c.1, sup. No.1, tome 45, p. 279.
6. Irie F. et al. – Proc. of the Tenth Int. Cryogenic Eng. Conf. Helsinki, 1984, p. 153.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что схема эвакуации энергии из магнитной системы нуклотрона на внешнее сопротивление удовлетворяет поставленным требованиям. При этом необходимо обеспечить максимальное напряжение при эвакуации около 40 В на один магнит, что соответствует общему напряжению на полукольце дипольных магнитов ускорителя – 2 кВ. Для напряжения эвакуации на одном магните ~ 60 В измеренная эффективность вывода энергии составила ~ 96%.

Авторы благодарны Л.Н.Зайцеву и Б.Д.Зельдичу за помощь в подготовке и проведении эксперимента.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 июня 1989 года.