



**объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна**

2415/2-81

P9-81-114

П.Г.Василев, Н.М.Владимилова, В.И.Волков,  
И.Н.Гончаров, Л.Н.Зайцев, Б.Д.Зельдич,  
В.И.Иванов, Е.Д.Клешенко, В.Б.Хвостов

**ИЗМЕРЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ТОКА  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ НТ-50  
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ОБЛУЧЕНИИ  
ЧАСТИЦАМИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ**

Направлено на VII Всесоюзное совещание  
по ускорителям заряженных частиц.  
Дубна, октябрь, 1980

**1981**

Разработка целого ряда физических установок и устройств со сверхпроводящими магнитами, которые должны действовать в мощных полях излучений, не может осуществляться без учета радиационного нагрева их обмоток. В первую очередь это относится к ускорителям заряженных частиц. Несколько работ /см., например, <sup>2-4</sup> и обзор <sup>1</sup> /, посвящено проблеме стабильности сверхпроводящих магнитов той или иной конструкции, облучаемых частицами как прямых пучков, так и полученных после рассеяния последних на мишенях. Однако, ввиду отсутствия экспериментальных данных о поле излучения, приводящего к переходу магнита в нормальное состояние, эти результаты, как правило, трудно использовать для прогнозирования поведения магнитов другой конструкции. Дополнительная полезная информация может быть получена при облучении в хорошо контролируемых условиях коротких образцов сверхпроводников, нагруженных током и помещенных во внешнее магнитное поле. Такая задача и решалась в настоящей работе.

Измерения проводились нами с помощью специального криогенного стенда на пучках заряженных частиц синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ с энергией в несколько ГэВ. В качестве образца был выбран неизолированный мелкодисперсный провод  $\phi 0,5$  мм, содержащий 1045 сверхпроводящих нитей  $\phi 10$  мкм из HT-50 в медной матрице с коэффициентом заполнения 50%. Он был смонтирован на специальном держателе /см. рис.1/. Верхняя часть образца помещалась между двумя стеклотекстолитовыми пластинками длиной 50 мм, одна из которых, толщиной 1,5 мм, имела канавки для образца глубиной 1 мм, заполненные вакуумной смазкой типа "Апиезон", а другая, толщиной 0,5 мм, служила крышкой. Плоскости, обращенные друг к другу, также промазывались "Апиезоном". Эта часть образца далее будет называться "закрытым" образцом. Нижняя часть образца длиной 45 мм была погружена непосредственно в жидкий гелий /"открытый" образец/.

Схема эксперимента приведена на рис.2. Образец СП располагается перпендикулярно магнитному полю сверхпроводящего соленоида СПС, который имел внутренний  $\phi 40$  мм и зазор между двумя симметричными катушками 12 мм. Магнитное поле было однородным с точностью до 0,2% в цилиндрической области  $\phi 15$  мм и длиной 10 мм вдоль оси СПС.

Полное число частиц в импульсе измерялось с помощью плоскопараллельной ионизационной камеры, наполненной гелием до



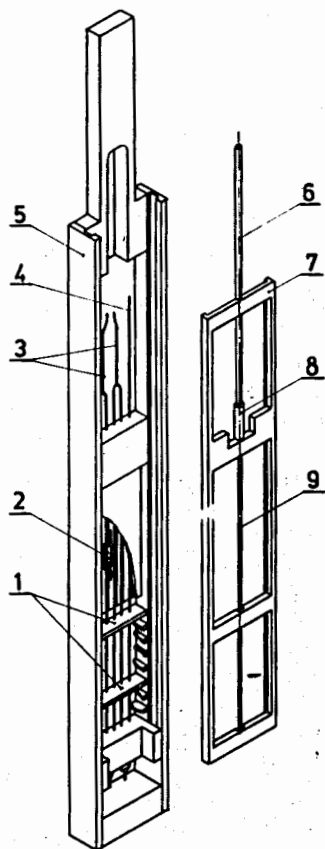


Рис.1. Держатель образца. 1 - стекло-текстолитовые распорки, 2 - микронагреватель на образце, 3 - дополнительные токоподводы, 4 - образец, 5 и 7 - рамки, 6 - волоконный световод, 8 - обойма, 9 - сцинтиллятор.

0,5 атм. Она калибровалась активационным методом. Пространственное распределение частиц в каждом импульсе регистрировалось ЭВМ по сигналам с многопроволочной ионизационной камеры<sup>5/</sup>, в которой расстояние между проволоками было 2 мм. Расходимость пучка определялась путем его фотографирования на рентгеновскую пленку в трех местах вдоль оси. По этим данным, используя методику работы<sup>6/</sup>, вычисляли параметры пучка в месте расположения образца. Специальный расчет на ЭВМ показал, что они не меняются более чем на 5% после включения продольного магнитного поля СПС до 5Т. Как правило, поперечное сечение пучка было круглым со среднеквадратичными размерами  $18 \pm 24$  мм /в предположении, что плотность частиц в пучке распределена по нормальному закону/.

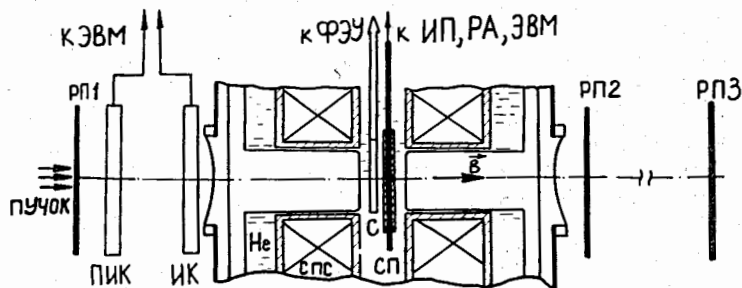


Рис.2. Схема эксперимента. ИП - источник питания, РА - регистрирующая аппаратура, ИК - ионизационная камера, ПИК - многопроволочная ионизационная камера, РП - рентгеновская пленка, С - сцинтиллятор.

Среднеквадратичное смещение центра тяжести пучка обычно не превышало 0,5 мм по вертикали и 2 мм по горизонтали.

Число частиц в каждом импульсе, прошедших избранный участок образца, контролировалось по сигналу со сцинтиллятора  $\phi 1$  мм, который располагался непосредственно перед этим участком в той же вертикальной плоскости.

Вследствие достаточно большого значения критического тока образца  $I_c \approx 150$  А/ переход его в нормальное состояние происходил скачкообразно. При этом большая часть тока ответвлялась в резистивный шунт из манганина сопротивлением  $0,34$  мОм, подключенный параллельно образцу. Это предотвращало перегрев и сгорание образца. Появление напряжения на образце воздействовало на электронное устройство, которое отключало ток и посылало сигнал о переходе в ЭВМ и на самописец.

Эксперименты по определению зависимости максимального допустимого флюенса  $\Phi_{обр.}$  от подкритичности  $I/I_c$  ставились следующим образом /здесь  $I$  - рабочий ток через образец, а  $I_c$  - критический ток в отсутствие пучка/. Против центра осевого канала СПС, в который проходил пучок, помещался открытый или закрытый образец. Один из центральных участков его нагружался добавочным током 8-10 А и в поле 5Т определялся  $I_c$  этого участка. В некоторых случаях место перехода локализовалось пропуском тока через микронагреватель на закрытом образце. Далее при заданной по пикап-электроду интенсивности пучка проводилось несколько серий измерений при различных  $I/I_c$ , менявшихся через равные промежутки так, что перекрывался весь интервал вероятностей переходов образца в нормальное состояние  $P(\Phi_{обр.})$  от 0 до 1. Затем менялась интенсивность, снова проводилось несколько серий измерений и т.д.

В процессе обработки результатов измерений, выполненных при определенной длительности импульса выведенного пучка частиц  $t_{имп}$ , переход от флюенса к дозе /энерговыведению/ в образце осуществлялся по методике, описанной в работах<sup>7,8/</sup>. Правильность ее была проверена, в частности, при сравнении с величиной энерговыделения в НТ-50, определенной нами экспериментально<sup>9/</sup> на пучке протонов с энергией 8,5 ГэВ. /Кoeffициент перехода от флюенса к дозе для образца толщиной 2 мм оказался  $/2,5 \pm 0,8/ \cdot 10^{-13}$  Дж  $\cdot$  г $^{-1}$  прот $^{-1}$  см $^2$ / . При расчете учитывался вынос энергии из образца вторичными частицами. Коэффициенты перехода от флюенса к дозе для протонов /  $E = 6,4$  ГэВ/, дейтронов /  $E = 7,3$  ГэВ/ и альфа-частиц /  $E = 8,8$  ГэВ/ получились соответственно 2,6; 3,5 и  $11,3 \cdot 10^{-13}$  Дж г $^{-1}$  част $^{-1}$  см $^2$ .

На рис.3 представлены результаты измерения допустимого энерговыделения  $W$  в образце в зависимости от подкритичности при различных условиях теплоотвода и  $t_{имп}$ . На рис.3а приведены величины  $W$ , отвечающие линейной экстраполяции к нулю кри-

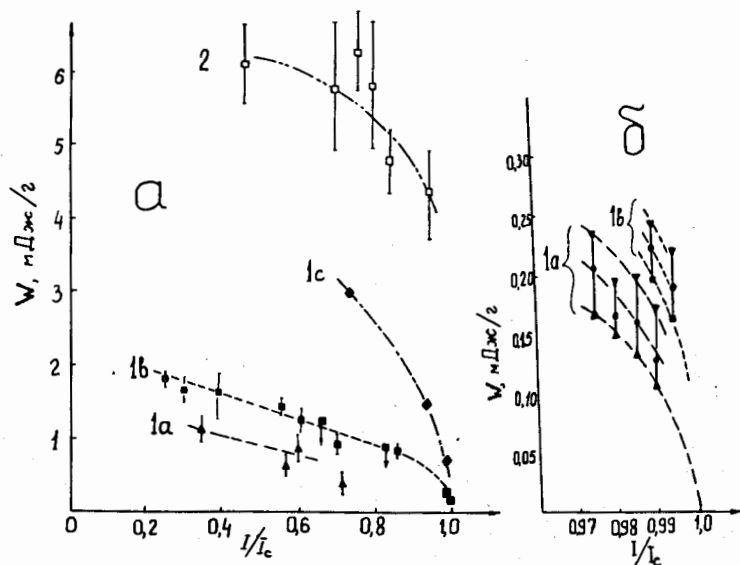


Рис.3. Результаты измерения допустимого энерговыделения на пучках частиц при  $T_b = 4,2\text{K}$ ,  $B = 5\text{T}$ . Кр. 1а - с включением нагревателя образца, остальные - с центральным участком, нагруженным добавочным током.

Образец	Закрытый				Открытый	
	слева	справа	слева	справа		
Кривые	1а	1б	1а	1б	1с	2
Частицы	d	p	a	a	p	p
Энергия, ГэВ	7,3	6,4	8,8	8,8	6,4	6,4
$t_{\text{имп}}$ , мс	~1	~1	~1	~1	100	~1

вых зависимости вероятности перехода от плотности потока частиц  $P(\Phi_{\text{обр.}})$ , а на рис.3б - нижние, средние и верхние точки, соединенные вертикальным отрезком, отвечают  $P = 0; 0,5$  и  $1$ . Погрешность в определении энерговыделения не более 30%.

Сравнение результатов с расчетами на основе энтальпии сделать затруднительно, т.к. необходимо точно знать теплоемкость данного провода, да к тому же еще в магнитном поле. По оценкам, для перехода в нормальное состояние от  $I/I_c = 0,4$ , что соответствует перегреву от  $4,2$  до  $6,2\text{K}$ , изменение энтальпии /по тепло-

емкости в нулевом поле/ может составлять  $0,5-0,8$  мДж/г. Магнитное поле  $5\text{T}$  в диапазоне  $4,2-7,6\text{K}$  должно приводить к некоторому повышению этой величины. Таким образом, в случае закрытого образца, облучаемого короткими импульсами  $< 10$  мс/, по крайней мере, для  $I/I_c < 0,6$ , полученные нами данные /см. кр.1а/, по-видимому, близки к нагреву в адиабатических условиях.

Систематически наблюдавшееся снижение кривой  $W(I/I_c)$  при использовании нагревателя /см. кривые 1а и 1б/ может быть объяснено, по крайней мере, частично, если предположить, что небольшое количество жидкого гелия, проникшего к образцу по трещинам в "Апиезоне", превращается в пар после включения нагревателя.

Результаты, полученные на открытом образце, во-первых, свидетельствуют о том, что даже для самого короткого из применявшихся в данной работе импульсов  $\sim 1$  мс существенно теплопередача к жидкому гелию. Во-вторых, большому изменению перегрева образца /от  $0,7\text{K}$  до  $2\text{K}$ , что соответствует интервалу  $I/I_c$  от  $0,8$  до  $0,4$ / отвечает почти одна и та же величина  $W$  и пропорциональная ей средняя за время  $t_{\text{имп}}$  плотность теплового потока  $\bar{q}$  через боковую поверхность провода /при  $W = 6$  мДж/г и  $t_2 \sim 1$  мс  $\bar{q} \leq 0,6$  Вт/см<sup>2</sup>/ . Аналогичное явление наблюдалось в работе<sup>2/</sup> при облучении магнита импульсами длительностью  $10^3$  мс. Нам представляется разумным сделанное там предположение о влиянии временных флуктуаций интенсивности пучка, приводящих к возникновению пленочного кипения гелия за счет кратковременного резкого превышения  $\bar{q}$  над средней величиной.

Полученные в настоящей работе кривые  $W(I/I_c)$  при  $B = \text{const}$  нельзя без соответствующего пересчета сопоставлять с кривыми  $W(I/I_{\text{макс}})$ , полученными при облучении магнитов, когда  $B = B(I)$ . Последняя более круто поднимается вверх и при  $I = 0$  соответствует допустимому перегреву  $\Delta T_{\text{магн}} = T_c - T_b$ , в то время как в первом случае  $\Delta T = T_c(B) - T_b$ . Здесь  $T_b$  - исходная температура сверхпроводника,  $T_c$  и  $T_c(B)$  - температуры перехода в нормальное состояние при  $B = 0$  и  $B \neq 0$ . Так, в случае нашего кабеля НТ-50, для  $B = 5\text{T}$  и  $T_b = 4,2\text{K}$  имеем  $\Delta T = 3,3\text{K}$ , а  $\Delta T_{\text{магн}} = 4,8\text{K}$ .

Заметим, кстати, что некоторые авторы /см.2,10/ при оценке допустимого перегрева в магните для  $I \neq 0$  используют приближенную формулу  $\Delta T_{\text{магн}} = (T_c - T_b)(1 - I/I_{\text{макс}})$  вместо точной  $\Delta T_{\text{магн}} = \{T_c[B(I)] - T_b\} \{1 - I/I_c[B(I)]\}$ , вследствие чего результаты, например, для магнита из НТ-50 с  $B_{\text{макс}} = 5\text{T}$ , могут различаться более чем на 20% в области  $I/I_{\text{макс}} > 0,75$ .

В заключение авторы выражают благодарность за помощь в подготовке и проведении измерений В.П.Бамблевскому, И.И.Куликову, В.М.Дробину, В.Г.Луппову, С.С.Медведеву, В.В.Пискалеву.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зайцев Л.Н. ЭЧАЯ, 1980, т.11, вып.3, с.525.
2. Edwards H. et al. IEEE Trans.on Magn., 1977, vol.Mag-13, p.666.
3. Cox B. et al. Rep. FERMILAB, TM-828-A, 1978.
4. Allinger J. et al. IEEE Trans.on Magn., 1979, vol.Mag-15, p.119.
5. Волков В.И. и др. ОИЯИ, 9-10104, Дубна, 1976.
6. Волков В.И. и др. ОИЯИ, 16-10812, Дубна, 1977.
7. Зайцев Л.Н. и др. ОИЯИ, 16-12264, Дубна, 1979.
8. Хвостов В.Б. Автореферат диссертации. ОИЯИ, 16-12929, Дубна, 1979.
9. Гончаров И.Н. и др. ОИЯИ, P8-12738, Дубна, 1979.
10. Маслов М.А., Мохов Н.В. Препринт ИФВЭ 79-135 ОРИ, Серпухов, 1979.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 февраля 1981 года.