

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ  
ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

И Ф В Э 86-161  
ОУНК

А.И.Агеев, Ю.Г.Божко, А.В.Жирнов, В.А.Кренделев,  
М.В.Левин, А.П.Орлов, Е.Г.Прошаев,  
А.В.Тарасов, В.П.Фомин

КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД  
ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЙ  
В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТАХ УНК

Серпухов 1986

Аннотация

Агеев А.И., Божко Ю.Г., Жирнов А.В. и др. Калориметрический метод измерения тепловыделений в сверхпроводящих магнитах УНК: Препринт ИФВЭ 86-161. - Серпухов, 1986. - 8 с., 6 рис., библиогр.: 7 назв.

Рассмотрен калориметрический метод измерения стационарных и нестационарных тепловыделений в СП-магнитах УНК, криостатируемых в циркуляционном режиме. Выполнен анализ погрешностей измерений. Приводятся результаты, полученные при измерении тепловыделений в моделях СП-диполей УНК.

Abstract

Ageev A.I., Bozhko Yu.G., Zhirnov A.V. et al. Calorimetric Method of Heat Load Measurement in UNK SC-magnets; IHEP Preprint 86-161. - Serpukhov, 1986. - p. 8, figs. 6, refs.: 7.

A calorimetric method of measuring steady and unsteady heat loads in the UNK SC-magnets in the forced circulation regime has been considered. Measurement errors have been analyzed. The results of heat load measurements in the UNK SC-dipole models are presented.

Данные о тепловыделениях в сверхпроводящих (СП) магнитах ускорительно-накопительного комплекса (УНК)/1/ необходимы для правильного выбора параметров как сверхпроводящей системы, так и системы криогенного обеспечения. Известные электрические методы измерения/2,3,4/ динамических потерь в СП-магнитах не позволяют выделить тепловыделения, приходящиеся непосредственно на криогенную систему. Определить нагрузку на криогенную систему, а также отдельные составляющие тепловыделений можно с помощью калориметрических методов/3,5/. В данной работе дается описание подобного метода, применяемого в ИФВЭ при исследовании моделей СП-диполей УНК в циркуляционном режиме охлаждения.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДА И РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

На криогенных стендах ИФВЭ по аналогии с УНК принят циркуляционный способ охлаждения СП-магнитов. Метод измерения тепловыделений основан на измерении количества тепла, воспринимаемого однофазным гелием (рис. 1). На входе и выходе СП-магнита измеряются давление и температура потока, по которым определяются термодинамические свойства гелия. По изменению температуры  $T_2$  при известном расходе гелия  $G$  вычисляются тепловыделения в СП-магните.

Потеря давления по длине одиночного СП-магнита длиной 6 м составляет  $\Delta P = P_2 - P_1 \approx 0,05 \cdot 10^5$  Па при абсолютном значении давления потока  $P_1 = 1,5 \cdot 10^5$  Па. Такое небольшое  $\Delta P$  приводит к незначительному изменению термодинамических свойств гелия. Поэтому в дальнейшем считаем  $P_2 = P_1$ .

Для вывода расчетных соотношений выделим в канале однофазного гелия участок длиной  $dx$  с тепловыделяющим элементом мощностью  $Q(r)$  (рис. 2). При постоянном расходе однофазного потока уравнение (1) энергии для тепловыделяющего элемента и уравнение (2) энергии для потока хладагента будут иметь вид

$$mC(T) \frac{\partial T}{\partial r} = Q(r) - Q_{H_0}(r), \quad (1)$$

$$m \frac{\partial H}{\partial r} + mw \frac{\partial H}{\partial x} = Q_{H_0}(r) + Q_{oc}(r). \quad (2)$$

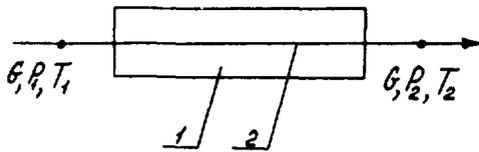


Рис. 1. Калориметрический метод измерения тепловыделений в циркуляционном режиме охлаждения. 1 - СП-магнит; 2 - поток однофазного гелия; G, P, T - датчики расхода, давления и температуры соответственно.

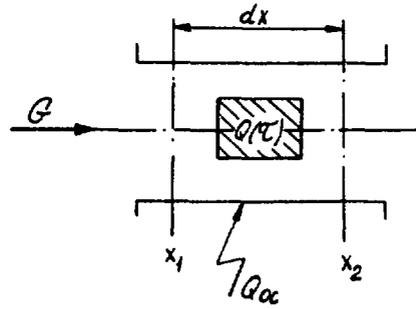


Рис. 2. Элементарный участок с тепловыделяющим элементом  $Q(r)$ .

Здесь и далее  $M$  и  $C(T)$  - масса и теплоёмкость тепловыделяющего элемента;  $Q_{He}(r)$  - тепловой поток, снимаемый с поверхности элемента хладагентом;  $m$  - масса хладагента в участке  $dx$ ;  $\rho$ ,  $w$ ,  $H$  - соответственно плотность, скорость и энтальпия хладагента. Из уравнений (1) и (2) получаем выражение, описывающее процесс криостатирования тепловыделяющего элемента:

$$m \frac{\partial H}{\partial r} + mw \frac{\partial H}{\partial x} + MC(T) \frac{\partial T}{\partial r} = Q(r) + Q_{oc} \quad (3)$$

В стационарном режиме на участках 1 и 3 (рис. 3) все переходные процессы закончены, и система пришла к установившемуся состоянию. Тогда уравнение (3) будет иметь вид

$$mw \frac{dH}{dx} = Q + Q_{oc} \quad (4)$$

Из уравнения (4) получаем выражение для определения стационарной тепловой нагрузки  $Q$ :

$$Q = G \{ [H(x_2, r_3) - H(x_2, r_1)] - [H(x_1, r_3) - H(x_1, r_1)] \} - [Q_{oc}(r_3) - Q_{oc}(r_1)], \quad (5)$$

где  $G = mw/dx$  - массовый расход хладагента.

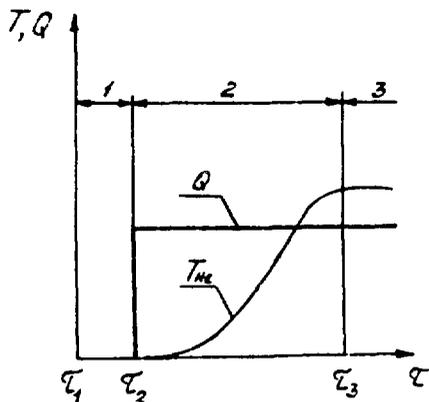


Рис. 3. Измерение стационарных тепловыделений.

В уравнении (5) величина  $Q_{oc}(r_3) - Q_{oc}(r_1)$  характеризует изменение теплопритоков из окружающей среды к СП-магниту при его нагреве. В процессе измерения тепловыделений нагрев магнита не должен превышать критической температуры сверхпроводящей обмотки, т.е. по отношению к температуре окружающей среды и к температуре азотных экранов разогрев магнита относительно невелик, а следовательно, невелико и изменение теплопритоков из окружающей среды. Анализ показывает, что разность  $Q_{oc}(r_3) - Q_{oc}(r_1)$  в сотни раз меньше величины  $Q$ . Поэтому в дальнейшем этой разностью можно пренебречь. Тогда уравнение (5) упростится:

$$Q = G \{ [H(x_2, r_3) - H(x_2, r_1)] - [H(x_1, r_3) - H(x_1, r_1)] \}. \quad (6)$$

При нестационарном режиме охлаждения примем за  $r_3$  (рис.4) время возвращения системы к первоначальному состоянию, имевшему место до подачи нагрузки  $Q$ . Проинтегрируем уравнение (3) для этого случая:

$$\int_{r_1}^{r_3} m \frac{\partial H}{\partial r} dr + \int_{r_1}^{r_3} m w \frac{\partial H}{\partial x} dr + \int_{r_1}^{r_3} MC(T) \frac{\partial T}{\partial r} dr =$$

$$= \int_{r_1}^{r_2} Q(r) dr + \int_{r_1}^{r_3} Q_{oc}(r) dr. \quad (7)$$

Как и в случае стационарной нагрузки, принимаем  $\int_{r_1}^{r_3} Q_{oc}(r) dr = 0$ .  
 Для нестационарного режима  $\int_{r_1}^{r_3} m \frac{\partial H}{\partial r} dr = 0$  и  $\int_{r_1}^{r_3} MC(T) \frac{\partial T}{\partial r} dr = 0$ .

Выражение  $\int_{\tau_1}^{\tau_2} Q(\tau) d\tau$  представляет собой количество тепла  $W$ ,

выделенного тепловыделяющим элементом за время действия нагрузки  $Q$ . С учётом этих соотношений уравнение (7) примет вид

$$W = G \int_{\tau_1}^{\tau_3} [H(x_2, \tau) - H(x_2, \tau_1)] d\tau - G \int_{\tau_1}^{\tau_3} [H(x_1, \tau) - H(x_1, \tau_1)] d\tau. \quad (8)$$

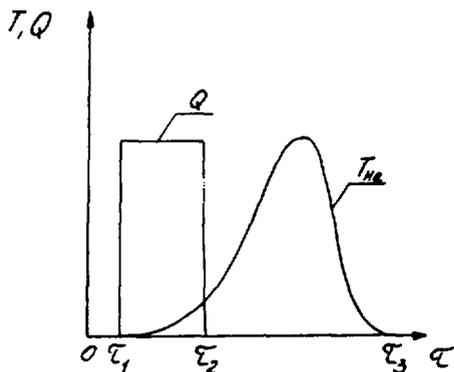


Рис. 4. Измерение нестационарных тепловыделений.

Если в сечении  $x_1$  (рис. 2) значение энтальпии  $H_1$  не изменяется за период времени от  $\tau_1$  до  $\tau_3$  (рис. 3, 4), то уравнения (6) и (8) запишутся как

$$Q = G [H(x_2, \tau_3) - H(x_2, \tau_1)], \quad (9)$$

$$W = G \int_{\tau_1}^{\tau_3} [H(x_2, \tau) - H(x_2, \tau_1)] d\tau. \quad (10)$$

В этом случае для определения тепловыделений можно использовать значения энтальпии только в точке (2) (рис. 1), т.е. при измерениях регистрируется изменение температуры потока только по термоматчику  $T_2$ , что существенно повышает точность измерений.

Итак, при измерении стационарных тепловыделений регистрируются параметры в точках 1 и 2 (рис. 1) до подачи нагрузки и после, по прошествии некоторого промежутка времени, необходимого для установления в системе состояния равновесия. Если температура в точке 1 не изменялась, то используется уравнение (9); при изменении  $T_1$  используется уравнение (6). В случае нестационарных тепловыделений температура  $T_2$  регистрируется непрерывно

в течение времени от  $\tau_1$  до  $\tau_3$ . Полученная температурная кривая переводится в энтальпийную и в зависимости от состояния  $T_1$  по уравнению (8) или (10) вычисляется количество тепла  $W$ , отводимого от СП-магнита в гелий. Величина  $W$ , деленная на временной интервал  $(\tau_2 - \tau_1)$ , дает среднеинтегральную мощность тепловыделений.

## ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ

Для удобства оценки погрешностей измерения тепловыделений представим уравнение (9) в виде

$$Q = G \bar{C}_p [T_{\text{He}}(x_2, \tau_3) - T_{\text{He}}(x_2, \tau_1)], \quad (11)$$

где  $T_{\text{He}}$  - температура гелия,  $\bar{C}_p$  - среднеинтегральное значение теплоемкости в интервале температур от  $T_{\text{He}}(\tau_1)$  до  $T_{\text{He}}(\tau_3)$ .

Погрешность измерения тепловыделений будет определяться, согласно<sup>6/</sup>, как:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta G}{G} + \frac{\Delta \bar{C}_p}{\bar{C}_p} + \frac{\Delta(\Delta T_{\text{He}})}{\Delta T_{\text{He}}}. \quad (12)$$

Разность температур  $\Delta T_{\text{He}} = T_{\text{He}}(x_2, \tau_3) - T_{\text{He}}(x_2, \tau_1)$  вычисляется при измерении приращения сопротивления термодатчика. Приняв в интервале  $\Delta T_{\text{He}}$  зависимость калибровочной кривой термодатчика  $R = i(T)$  линейной, можно записать

$$\Delta T_{\text{He}} = \Delta R \frac{1}{\delta R / \delta T}, \quad (13)$$

где  $\delta R / \delta T$  - чувствительность термодатчика. Тогда

$$\frac{\Delta(\Delta T_{\text{He}})}{\Delta T_{\text{He}}} = \frac{\Delta(\Delta R)}{\Delta R} + \frac{\Delta(\delta R)}{\delta R} + \frac{\Delta(\delta T)}{\delta T}. \quad (14)$$

В уравнении (13) величина  $\delta R / \delta T$  была определена экспериментально с помощью эталонного датчика, имеющего погрешность калибровки  $\pm 0,02$  K в интервале от 4 до 7 K ( $\delta T = 3$  K). От-

сюда  $\frac{\Delta(\delta T)}{\delta T} = \frac{2 \cdot 0,02}{3} \cdot 100\% = 1,3\%$ . Погрешности  $\Delta(\Delta R) / \Delta R$  и  $\Delta(\delta R) / \delta R$  определяются погрешностями электронной аппаратуры. Для используемой системы диагностики суммарная погрешность аппаратуры составляла величину  $\sim 1,2\%$ . Таким образом, ошибка измерения разности температур составит  $\frac{\Delta(\Delta T_{\text{He}})}{\Delta T_{\text{He}}} \approx 2,5\%$ .

Теплоемкость гелия  $\bar{C}_p$  рассчитывается по уравнениям состояния<sup>/7/</sup> как функция температуры и давления. Анализ показывает, что при имеющихся точностях измерений  $T$  и  $P$  погрешность вычисления теплоёмкости гелия составляет  $\Delta \bar{C}_p / \bar{C}_p = 2,8\%$ .

Для измерения величины массового расхода гелия применялся калориметрический расходомер, в котором для определения расхода используется уравнение (9), т.е. приведенные выше выкладки о погрешностях  $\Delta(\Delta T_{He})/\Delta T_{He}$  и  $\Delta \bar{C}_p / \bar{C}_p$  будут соответствовать и погрешностям расходомера.

Учитывая, что мощность на нагревателе  $Q_H$  датчика расхода измеряется с погрешностью 0,5%, имеем:

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{\Delta \bar{C}_p}{\bar{C}_p} + \frac{\Delta(\Delta T_{He})}{\Delta T_{He}} + \frac{\Delta Q_H}{Q_H} = 2,5 + 2,8 + 0,5 = 5,8\%.$$

Таким образом, погрешность измерения тепловой мощности составит

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 5,8 + 2,5 + 2,8 \approx 11\%.$$

Величина  $\Delta Q/Q$  была оценена также экспериментально, для чего в гелиевом канале между датчиками  $T_1$  и  $T_2$  (рис. 1) был установлен электронагреватель. Расхождения между введенной и измеренной мощностями тепловыделений не превысили 5%.

## ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЙ В МОДЕЛЯХ СП-МАГНИТОВ УНК

Описанная методика применялась при экспериментальном исследовании метровых и полномасштабных (шестиметровых) моделей СП-магнитов УНК<sup>/1/</sup>. Для измерения и обработки результатов использовался аппаратный комплекс связи СУММА и ЭВМ СМ-4.

На полномасштабной модели СП-диполя были проведены синхронные измерения тепловыделений калориметрическим и электрическим методами в различных треугольных токовых циклах. На рис. 5 и 6 показаны результаты измерений, из которых видно, что между электрическим и калориметрическим способами измерений тепловыделений имеется хорошее соответствие. Если учесть, что электрический метод дает величину суммарных тепловыделений, то для исследуемой конструкции магнита практически все тепловыделения приходится на систему криогенного обеспечения.

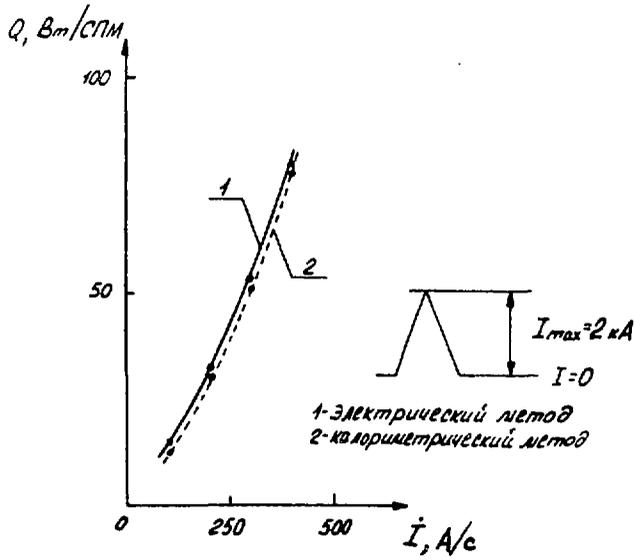


Рис. 5. Мощность тепловыделений в треугольных электрических циклах для шестиметрового СП-магнита ( $I=0-2\text{kA}-0$ ).

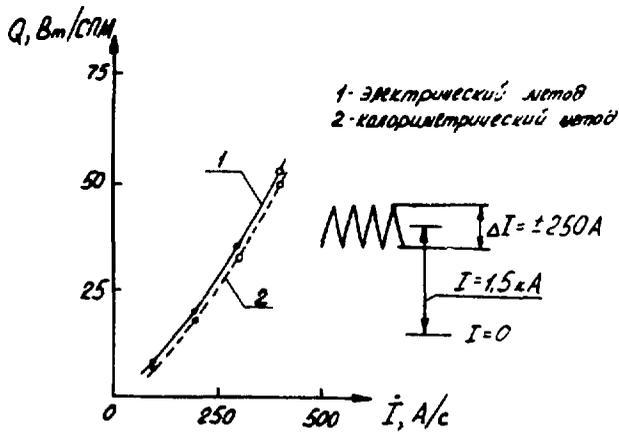


Рис. 6. Мощность тепловыделений в шестиметровом СП-магните в треугольных циклах при  $I=1250 \text{ A} - 1750 \text{ A} - 1250 \text{ A}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный калориметрический метод позволяет измерять в СП-магнитах тепловыделение, приходящиеся на криогенную систему, с погрешностью не более 11%. Такая точность достигается использованием для измерений одного термодатчика. В отличие от известных электрических методов данный метод может применяться для измерения тепловыделений по различным составляющим магнитного цикла.

### Литература

1. Агеев А.И., Андреев Н.И., Балбеков В.И. и др. - Препринт ИФВЭ 84-204, Серпухов 1984.
2. Wilson M.N. - Cryogenics, 1973, v. 13, N 6, p. 361.
3. Брехна Г. - Сверхпроводящие магнитные системы. - М.: Мир, 1976, с. 351.
4. Васильев В.А., Дмитриевский Ю.П., Злобин А.В. и др. - Препринт ИФВЭ 79-161, Серпухов 1979.
5. Kuchnir M. - Adv. Cryog. Eng. Proc. Cryog. Eng. Conf., 1981, v. 27, pp. 1205-1209.
6. Драксел Р. Основы измерительной техники. - М.: Энергоиздат, 1982, с. 25-32.
7. McCarty R.D. J. Phys. Chem. Ref. Data, 1973, v. 2, N 4, p. 923-1041.

Рукопись поступила 4 июля 1986 года.

А.И.Агеев и др.

Калориметрический метод измерения тепловыделений  
в сверхпроводящих магнитах УНК.

Редактор В.В.Герштейн. Технический редактор Л.П.Тимкина.  
Корректор Т.Д.Галкина.

---

Подписано к печати 23.07.86 г. Т-16786. Формат 60х90/16.  
Офсетная печать. Печ.л. 0,50. Уч.-изд.л. 0,58. Тираж 250.  
Заказ 850. Индекс 3624. Цена 9 коп.

---

Институт физики высоких энергий, 142284, Серпухов Мос-  
ковской обл.

9 коп.

Индекс 3624

ПРЕПРИНТ 86-161, ИФВЭ, 1986