

# ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУБЛЕТОВ КВАДРУПОЛЬНЫХ МАГНИТОВ БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

*А. А. Котова<sup>1</sup>, Д. Н. Никифоров, Г. Г. Ходжибагиян*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Бустерный синхротрон ускорительного комплекса NICA в Дубне предназначен для предварительного накопления и ускорения тяжелых ионов перед инжекцией в нуклотрон. В данной работе представлены экспериментальные и расчетные данные статического теплопритока и динамических тепловыделений в квадрупольных магнитах бустерного синхротрона. Полученные результаты будут учтены при разработке новых сверхпроводящих магнитов и криогенных установок.

The Booster synchrotron of the NICA accelerator complex in Dubna is designed for preliminary accumulation and acceleration of heavy ions before injection into the Nuclotron. This article presents experimental and calculated data of static heat leak and dynamic heat releases in quadrupole magnets of the Booster synchrotron. Obtained results will be taken into account for development of new superconducting magnets and cryogenic installations.

PACS: 29.20.-c; 07.20.Mc; 84.71.Ba

## ВВЕДЕНИЕ

NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) — ускорительный комплекс в Лаборатории физики высоких энергий (ЛФВЭ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубне, создаваемый для изучения свойств горячей и плотной барионной материи. Он включает в себя: инжекционный комплекс, состоящий из инжекторов легких и тяжелых ионов, бустерный синхротрон, синхротрон нуклотрон, коллайдер с двумя кольцами, которые расположены параллельно, друг над другом, и детекторы MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector) [1]. Рассматриваемый в работе бустерный синхротрон предназначен для предварительного накопления и ускорения тяжелых ионов и включает в себя: 40 дипольных магнитов, 16 дублетов квадрупольных магнитов с дипольным корректором (ДК) и 8 дублетов квадрупольных магнитов с ДК и мультипольным корректором (МПК).

---

<sup>1</sup>E-mail: borczova@jinr.ru

Корректирующие магниты предназначены для коррекции орбиты и фокусировки пучка. ДК состоит из двух дипольных обмоток: горизонтальной и вертикальной, МПК — из четырех обмоток: секступольной, октупольной и повернутых секступольной и квадрупольной.

Сверхпроводящие (СП) магниты для комплекса NICA производятся в ЛФВЭ и подвергаются ряду испытаний, из них основные — криогенные. Они включают в себя несколько этапов: охлаждение магнита до температуры 4,5 К, тренировку СП-обмотки, магнитные измерения при температуре жидкого гелия, измерение выделений тепла и гидравлического сопротивления охлаждающего канала, поиск «холодных» течей и отопление. Выделения тепла в СП-магните включает в себя статический теплоприток из окружающей среды к «холодному» магниту и динамические тепловыделения в СП-обмотке и железном ярме при работе в импульсном режиме.

В данной работе представлены экспериментальные и расчетные данные статического теплопритока и динамических тепловыделений в дублетах квадрупольных магнитов бустерного синхротрона различного типа.

## 1. СТАТИЧЕСКИЙ ТЕПЛОПРИТОК

Расчетный суммарный статический теплоприток к СП-магниту определяется как сумма следующих составляющих: теплопритока лучеиспусканием, теплопритока теплопроводностью остаточных газов и через тепловые мосты.

**1.1. Теплоприток лучеиспусканием.** Для рассматриваемых СП-магнитов теплоприток включает в себя: лучеиспускание от вакуумного кожуха к ярму магнита через технологические отверстия в тепловом экране для системы подвеса и системы вакуумирования; лучеиспускание от внутренней поверхности теплового экрана к ярму магнита. Тепло, передаваемое лучеиспусканием, рассчитывается по соотношению Стефана–Больцмана [2]

$$Q_l = \varepsilon_n C (T_2^4 - T_1^4) A, \quad (1)$$

где  $Q_l$  — теплоприток лучеиспусканием (Вт);  $\varepsilon_n$  — приведенный коэффициент излучения поверхности;  $C$  — постоянная Стефана–Больцмана (Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $T_2$ ,  $T_1$  — температура теплой и холодной поверхностей (К);  $A$  — площадь поверхности лучеиспускания (м<sup>2</sup>).

**1.2. Теплоприток теплопроводностью остаточных газов.** В вакуумном кожухе магнита при давлении менее 10<sup>-3</sup> Па теплопроводность остаточных газов становится пропорциональна давлению из-за большой длины свободного пробега молекул. Тогда для цилиндрических сосудов теплоприток может быть рассчитан по соотношению [3]

$$Q_g = \frac{1,82 \cdot 10^5 A_1 \alpha_1 \alpha_2 (k+1) p (T_2 - T_1)}{\alpha_2 + (A_1/A_2)(1 - \alpha_2) \alpha_1 (k-1) (MT)^{1/2}}, \quad (2)$$

где  $Q_g$  — теплоприток теплопроводностью остаточных газов (Вт);  $A_1$ ,  $A_2$  — площади поверхности внутреннего и внешнего сосуда (м<sup>2</sup>);  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — коэффициент аккомодации между газом и поверхностью при температурах  $T_1$ ,  $T_2$ ;  $k$  — показатель адиабаты;  $p$  — давление в сосуде (Па);  $M$  — молекулярная масса смеси газов;  $T$  — температура манометра (К).

Для расчетов в качестве остаточного газа в изоляционном объеме криостата рассматривается смесь гелия — He — и азота — N<sub>2</sub>.

**1.3. Теплоприток по тепловым мостам.** Теплоприток по тепловым мостам определяется из уравнения теплопередачи

$$Q_t = \lambda \Delta T S / l, \quad (3)$$

где  $Q_t$  — теплоприток по тепловым мостам (Вт);  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности (Вт/м·К);  $S$  — площадь сечения теплового моста ( $\text{м}^2$ );  $\Delta T$  — перепад температуры (К);  $l$  — длина теплового моста (м).

СП-магниты ускорительного комплекса НИСА фиксируются в криостате с помощью восьми тяг из стали 12Х18Н10Т. После охлаждения магнита до рабочей температуры в тягах возникает большой градиент температуры от 293 до 4,5 К. Тогда расчетный по соотношению (3) приток тепла к магниту по восьми тягам составляет 2,9 Вт. Для уменьшения данного значения в конструкции СП-магнита предусмотрены тепловые связи с азотным экраном (рис. 1), за счет которых в тягах изменяется градиент температуры от 82 до 4,5 К, что снижает теплоприток к СП-магниту от 2,9 до 1 Вт.

В дублетах квадрупольных магнитов с ДК и МПК имеются дополнительные тепловые мосты — слаботочные медные токовводы, которые охлаждаются с помощью тепловых «якорей». «Якорь» представляет собой пластину из стеклотекстолита, плакированную с двух сторон медью, и припаянную с одной стороны к токовводу, а с другой — к охлаждающей поверхности. Теплоприток от четырех слаботочных токовводов ДК — 0,35 Вт и от восьми слаботочных токовводов МПК — 2 Вт.

Магнитное поле в СП-магнитах измеряется с помощью датчика, который расположен в апертуре ярма. При гелиевой температуре магнита измеренное значение

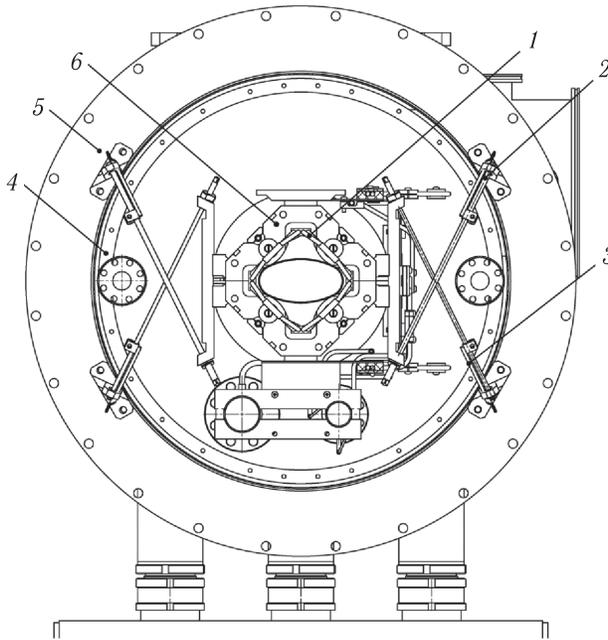


Рис. 1. СП-магнит в криостате: 1 — СП-обмотка; 2 — тяга; 3 — тепловая связь к азотному экрану; 4 — тепловой экран (82 К); 5 — кожух криостата (293 К); 6 — ярмо СП-магнита (4,5 К)

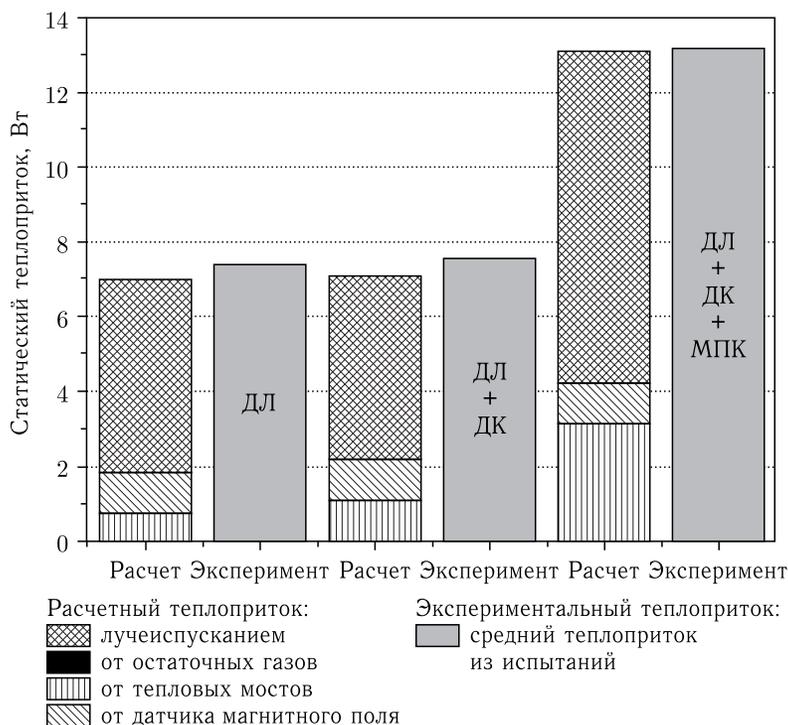


Рис. 2. Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных статических теплопритоков для различных типов дублетов квадрупольных магнитов

температуры датчика составляет около 100 К. Расчетное значение теплопритока от датчика магнитного поля к магниту составляет 1,09 Вт.

Результаты сравнительного анализа расчетных и средних экспериментальных значений статического теплопритока для дублетов квадрупольных магнитов NICA приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что полученные расчетные и средние экспериментальные значения статического теплопритока имеют незначительное расхождение, для дублетов квадрупольных магнитов с ДК оно составляет 6%, с ДК и МПК — 1%. Теплоприток к магнитам с ДК и без корректора мало отличаются между собой, что объясняется тем, что ДК находится внутри дублета квадрупольных магнитов. Теплоприток лучеиспусканием для обоих случаев одинаков, поэтому вклад в разницу статических теплопритоков вносят слаботочные токовводы ДК. Также можно отметить, что теплоприток теплопроводностью остаточных газов пренебрежимо мал (0,02 Вт). Это объясняется наличием высокого вакуума в изоляционном объеме криостата.

## 2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ

Динамические тепловыделения в СП-магните возникают в СП-обмотке и ярме магнита. Рассчитав тепловыделения в обмотке и измерив суммарные тепловыделения в магните, можно определить величину тепловыделений в ярме магнита. В СП-обмотках бустерного синхротрона ускорительного комплекса NICA используется

**Параметры СП-кабеля для магнитов бустерного синхротрона комплекса NICA**

Параметр	Значение
Критический ток в поле 2,5 Тл при 4,7 К, А	14200
Номинальный ток при 1,8 Тл и 4,65 К, А	9680
Диаметр СП-волокон, мкм	7
Диаметр провода, мм	0,78
Отношение меди к сверхпроводнику	1,26/1
Диаметр охлаждающего канала, мм	3
Шаг скрутки волокон, мм	7
Шаг транспонирования проводов, мм	50
Число проводов в кабеле	18
Длина СП-кабеля, м	41,2

Nb–Ti трубчатый СП-кабель (параметры кабеля приведены в таблице). Кабель такого типа хорошо себя зарекомендовал при работе на синхротроне нуклотрон в ОИЯИ (Дубна), более подробное описание данного СП-кабеля приведено в работе [4].

Потери энергии в СП-обмотке подразделяются на: гистерезисные, вихревые и кооперативные. Для рассматриваемой СП-обмотки основной вклад в тепловыделения вносят гистерезисные и вихревые потери. Гистерезисные потери представляют собой потери на перемагничивание сверхпроводника. Уменьшить гистерезисные потери можно, уменьшая диаметр СП-волокна. Вихревые потери — омические потери, которые появляются в результате протекания вихревых токов в стабилизирующей матрице внутри стренда. Их можно снизить уменьшением шага скрутки СП-волокон в проводе и увеличением омического сопротивления материала матрицы.

Полные гистерезисные потери в СП-обмотке за один цикл (Дж/цикл) могут быть рассчитаны по соотношению [5]

$$Q_G = \frac{8}{3\pi} J_c d_a B_m \lambda V, \quad (4)$$

где  $Q_G$  — полные гистерезисные потери в СП-обмотке за один цикл (Дж/цикл);  $J_c$  — критическая плотность тока ( $A/m^2$ );  $d_a$  — диаметр СП-волокна (м);  $B_m$  — амплитуда магнитного поля (Тл);  $\lambda$  — объемная доля сверхпроводящих волокон в проводе;  $V$  — объем проводов ( $m^3$ ). Для ускорительного комплекса NICA  $B_m = 1,8$  Тл, объемная доля сверхпроводящих волокон в СП-стренде бустерного синхротрона  $\lambda = 0,42$ . На рис. 3 приведен рабочий цикл бустерного синхротрона NICA. Расчетное значение гистерезисных потерь в обмотке дублета квадрупольных магнитов для стандартного цикла работы бустерного синхротрона — 1,105 Вт.

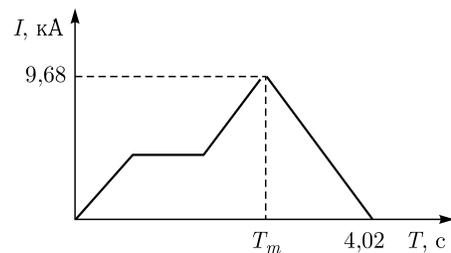


Рис. 3. Стандартный цикл работы бустерного синхротрона

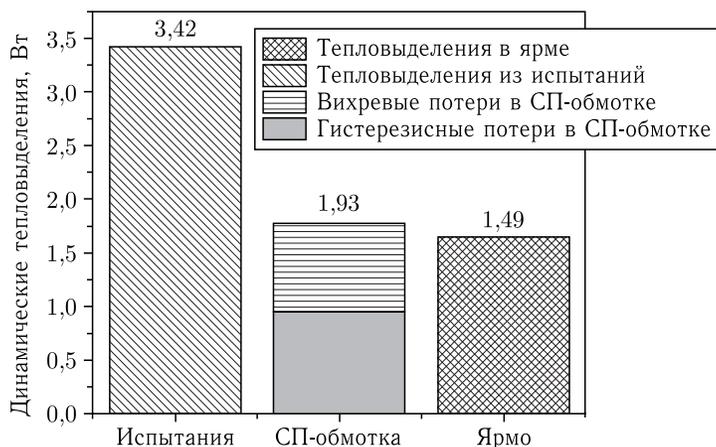


Рис. 4. Динамические тепловыделения дублета квадрупольных магнитов бустерного синхротрона без ДК и МПК

Вихревые потери в Дж/цикл определяются по соотношению [5]

$$Q_v = B_m^2 8\tau\lambda V / 6\mu_0 T_m, \quad (5)$$

где  $\tau$  — постоянная времени скрученного многоволоконного провода (с) (за это время затухают экранирующие токи после прекращения изменения внешнего магнитного поля);  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума (Н/А<sup>2</sup>);  $T_m$  — время нарастания поля (с).

Полученное расчетное значение вихревых потерь в обмотке дублета квадрупольных магнитов для стандартного цикла бустерного синхротрона — 0,825 Вт.

ДК и МПК имеют индивидуальное электропитание через слаботочные тоководы (40 А для ДК, 80 А для МПК). Подробный расчет и описание технологии их производства представлен в работе [6]. Среднее экспериментальное значение динамических тепловыделений, приходящихся на ДК, около 0,42 Вт, на МПК — 1,61 Вт.

Используя расчетные значения тепловыделений в обмотке, полученные по соотношениям (4) и (5), определим динамические тепловыделения, приходящиеся на ярмо магнита, как разницу экспериментального значения в СП-магните (3,42 Вт) и расчетного значения в СП-обмотке. Полученные значения тепловыделений для дублета квадрупольных магнитов без ДК и МПК представлены на рис. 4.

Из анализа данных на рис. 4 следует, что на ярмо приходится около 44 % от суммарных динамических тепловыделений. Также видно, что в обмотке гистерезисные потери, составляющие 32 % от суммарных тепловыделений, преобладают над вихревыми потерями, составляющими 24 %.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТ

В ходе проведения криогенных испытаний с помощью калориметрического метода определяются экспериментальные значения статического теплопритока и динамических тепловыделений в СП-магнитах.

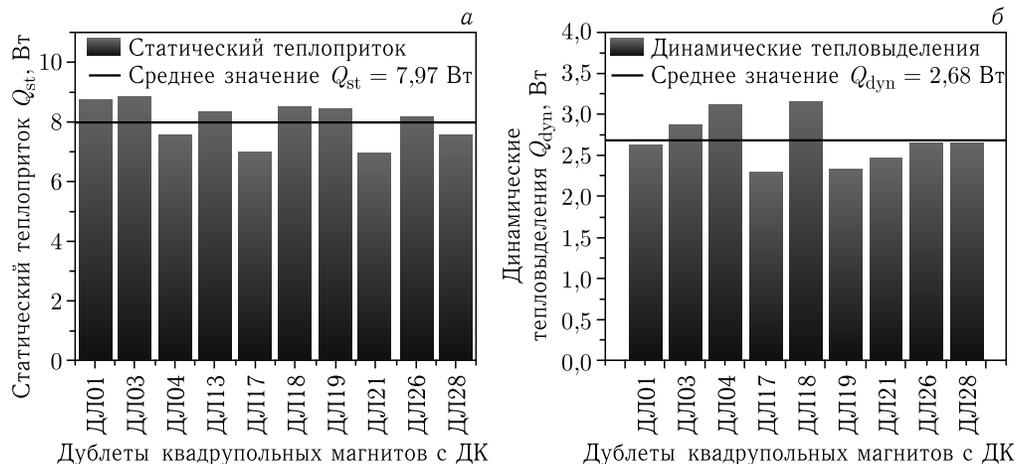


Рис. 5. Экспериментальные значения теплопритока к дублетам квадрупольных магнитов бустерного синхротрона с ДК: а) статический теплоприток дублетов квадрупольных магнитов с ДК; б) динамические тепловыделения дублетов квадрупольных магнитов с ДК

Калориметрический метод определения теплопритока к магниту основан на вычислении значений энтальпии жидкого гелия на входе в магнит и газообразного гелия на выходе из магнита, а также измерении массового расхода потока гелия через магнит [7].

Статический теплоприток и динамические тепловыделения в стандартном цикле работы бустерного синхротрона для дублетов квадрупольных магнитов с ДК получены калориметрическим методом и представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, экспериментальные данные имеют небольшой разброс, для статического теплопритока в среднем 0,6 Вт и для динамических тепловыделений — 0,2 Вт. Для статического теплопритока это связано с длительностью охлаждения магнита и погрешностью калориметрического метода. Однако основной вклад в различие полученных экспериментальных данных динамических тепловыделений вносят слабочные тоководы, технические характеристики которых изменялись.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены экспериментальные и расчетные значения статического теплопритока и динамических тепловыделений для дублетов квадрупольных магнитов бустерного синхротрона. Расхождение расчетного и среднего по эксперименту значений для дублета квадрупольных магнитов с ДК составляет 6%, с ДК и МПК — порядка 1%. Также на основе анализа полученных данных следует, что около 44% выделяемого тепла приходится на ярмо СП-магнита. Усовершенствование технологии изготовления СП-магнитов, длившееся порядка 10 лет, позволило уменьшить динамические тепловыделения в квадрупольных магнитах бустерного синхротрона в 7 раз по сравнению с магнитами нуклотрона [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мегaproект NICA. <http://nica.jinr.ru/ru/>.
2. Малков М. П. и др. Справочник по физико-техническим основам криогеники. М.: Энергоатомиздат, 1985. 432 с.
3. Скотт Р. Техника низких температур: Пер. под ред. М. П. Малкова. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
4. Baldin A. M., Averichev C. A., Agarov N. N., Donyagin A. M., D'yachkov E. I., Khodzhibagiyan H. G., Kovalenko A. D., Makarov L. G., Matushevskiy E. A., Smirnov A. A. Superconducting Fast Cycling Magnets of the Nuclotron // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1995. V. 5, No. 2. P. 875–877.
5. Уилсон М. Сверхпроводящие магниты: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 405 с.
6. Loshmanova K. V., Nikiforov D. N., Smirnov S. A. Correction Magnets for Booster of Accelerator Complex NICA // Proc. of the 15th Cryogenics 2019, IIR Conf. Prague, 2019; doi:10.18462/iir.cryo.2019.0012.
7. Bespalov Y. G., Nikiforov D. N. et al. Measurement of Static Heat Leak and Dynamic Heat Releases for NICA SC Magnets // Proc. of the 15th Cryogenics 2019, IIR Conf. Prague, 2019; doi:10.18462/iir.cryo.2019.0016.

Получено 25 февраля 2022 г.