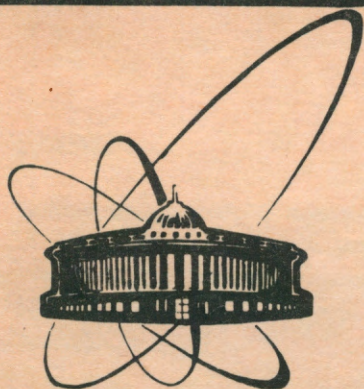


89-210



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

В 573

8-89-210

Н.М.Владимилова, В.М.Дробин, Е.И.Дьячков,
Н.А.Зиновьев, В.Н.Кузичев, Г.Л.Кузнецов,
Л.Н.Манятовская, А.Б.Марков, Э.Фишер,
Г.Г.Ходжибагиян

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССОВ
ОХЛАЖДЕНИЯ И ОТОГРЕВА
МАГНИТОВ НУКЛОТРОНА

1989

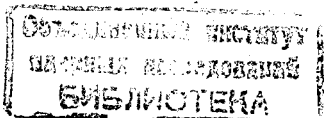
ВВЕДЕНИЕ

Работа выполнена в соответствии с программой создания нуклотрона^{1/} — сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер, сооружаемого в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Целью работы являлось получение экспериментальных данных, необходимых для расчетного анализа и последующего выбора режима охлаждения и отогрева магнитной системы^{2/} ускорителя. Масса дипольного магнита ~500 кг; длина трубчатого кабеля обмотки ~65 м; диаметр его канала для прокачки гелия — 4 мм. Конструкция прототипного магнита нуклотрона описана в^{3/}.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Охлаждение магнитов от комнатной до гелиевой температуры осуществляется с помощью сателлитного гелиевого рефрижератора^{4,5/} дроссельного типа. Проводились исследования одиночных магнитов, цепочки из двух и четырех дипольных магнитов нуклотрона. Схема экспериментальной установки, приведенная на рис.1, включает соответственно один, два или четыре магнита. Гелий для охлаждения магнитов направляется из рефрижератора в криостат 1, проходит теплообменник 2 и поступает в питающий коллектор 3, к которому параллельно подключены магниты. В каждом магните гелий из питающего коллектора последовательно проходит обмотку 4, теплообменник коллектора 5, трубку 6 для охлаждения ярма и сбрасывается в отводящий коллектор 7. Поток гелия после отводящего коллектора выводится из криостата, отогревается и поступает на измерение в газовый счетчик 9. Максимальная ошибка в определении массового расхода не превышает $\pm 3\%$. Температура потока гелия в точках ① — ①⑥ измеряется с помощью термометров сопротивления ТВО^{16/}. Вентиль В1 служит для регулирования потока гелия, подаваемого на охлаждение тоководов 10. Теплообменник 2 предназначен для получения, а теплообменники 5 — для поддержания в питающем коллекторе гелия в состоянии, не догретом до кипения, что необходимо для обеспечения равномерного распределения потока по магнитам в рабочих условиях. В конце процесса охлаждения через вентиль В2 поток гелия из отводящего коллектора



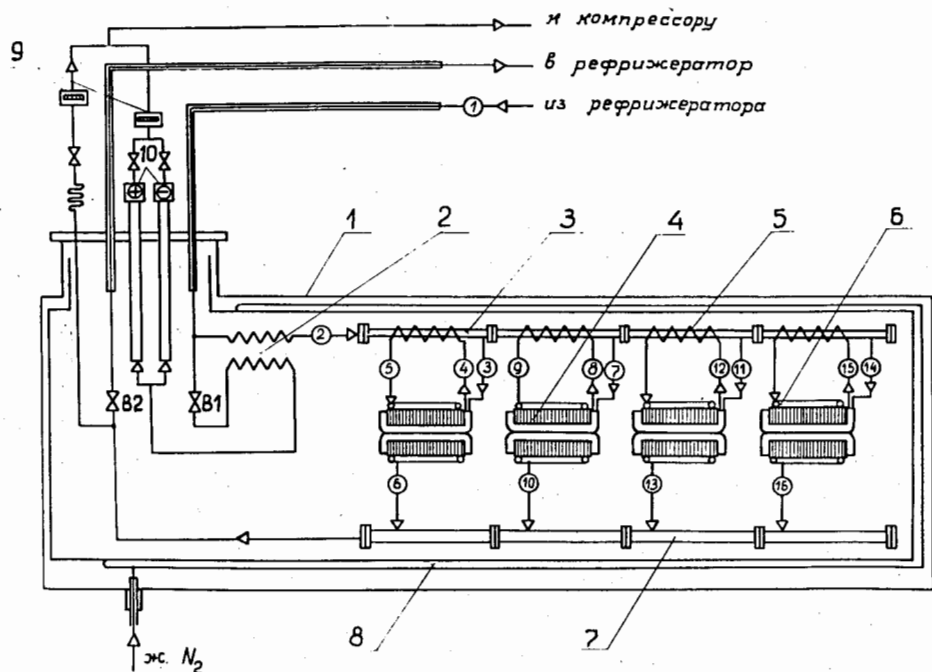


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 — вакуумный кожух криостата; 2 — теплообменник; 3 — коллектор питающий; 4 — обмотка; 5 — теплообменник коллектора; 6 — трубка для охлаждения ярма магнита; 7 — коллектор отводящий; 8 — экран азотный; 9 — счетчик газовый; 10 — токовводы. (1) — (16) — места установки датчиков температуры.

может быть направлен в рефрижератор. Магниты окружены тепловым экраном 8, охлаждаемым жидким азотом. К изоляционному вакуумному объему кожуха 1 подключен диффузионный вакуумный агрегат.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты экспериментального исследования процесса охлаждения одиночных дипольных магнитов нуклотрона приведены на рис.2.

Сателлитный гелиевый рефрижератор охлаждался до температуры ~ 90 К с помощью потока сжатого гелия, охлажденного в ванне с жидким азотом. Последующее охлаждение рефрижератора осуществлялось жидким гелием. Охлаждение магнитов (см. рис.2а и 2в) проводилось совместно с охлаждением рефрижератора. Охлаждение магнита в экспе-

рименте (см. рис.2б) начиналось после достижения в точке (1) рефрижератора азотной температуры, а в эксперименте (см. рис.2г) — после достижения в точке (1) гелиевой температуры.

В исследованиях (рис.2а и рис.2б) питающий коллектор с его теплообменником отсутствовал и точки (2) и (3), а также (4) и (5) совпадали (см. рис.1). Номера кривых на всех рисунках соответствуют номерам точек на рис.1. Величины \dot{m} , приведенные на рисунках, соответствуют среднему значению массового расхода гелия, проходящего через магниты, а V — количеству жидкого гелия, затраченному на охлаждение магнитов.

Площадь между кривыми 6 и 3 (см. рис.2) пропорциональна теплотемкости магнита и притоку (оттоку) тепла к нему. Относительно большая (по сравнению с теплотемкостью обмотки) площадь между кривыми 3 и 4 указывает на наличие теплообмена между ярмом и обмоткой магнита. Площадь между кривыми 2 и 3, а также 4 и 5 (см. рис.2в) пропорциональна количеству тепла, переданному в теплообменнике питающего коллектора. Площадь между кривыми 1 и 2 пропорциональна теплотемкости теплообменника 2 (см. рис.1) и притоку тепла к сифону и теплообменнику. На рис.2б пунктирной линией показано изменение температуры в точке (6) в отсутствие потока гелия через магнит. Магнит за 6 часов охладился за счет теплообмена с азотным экраном на 13 К. Температура экрана изменялась от 290 К в начальный момент времени до ~ 100 К в момент подачи потока гелия. При этом вакуум в изоляционном объеме криостата был на уровне 3 Па.

Результаты исследования процесса охлаждения пары магнитов приведены на рис.3. Более низкий темп охлаждения второго по ходу гелия магнита объясняется влиянием теплообменника питающего коллектора. Неравенство площадей между кривыми 7 и 3, 8 и 9 вызвано, на наш взгляд, наличием теплопритока к питающему коллектору от ярма магнита. Это предположение подтверждается сильным влиянием величины вакуума в изоляции на ход кривых (см. рис.3). В момент времени $\tau \approx 9$ ч к изоляционному объему был подключен вакуумный насос и вакуум в кожухе был изменен с $\sim 4,7$ до $\sim 1,4$ Па.

На рис.4 приведены результаты экспериментального исследования процесса охлаждения цепочки из четырех дипольных магнитов. Гидравлические сопротивления магнитов при комнатной температуре отличались на величину не более 3%. В момент времени $\tau = 39$ ч (см. рис.4а) и $\tau = 41$ ч (см. рис.4б) подавалось питание на электронагреватели*, встроенные в обмотку первых трех магнитов. Это позволяло не до-

* Предложено совместно с А.А.Смирновым.

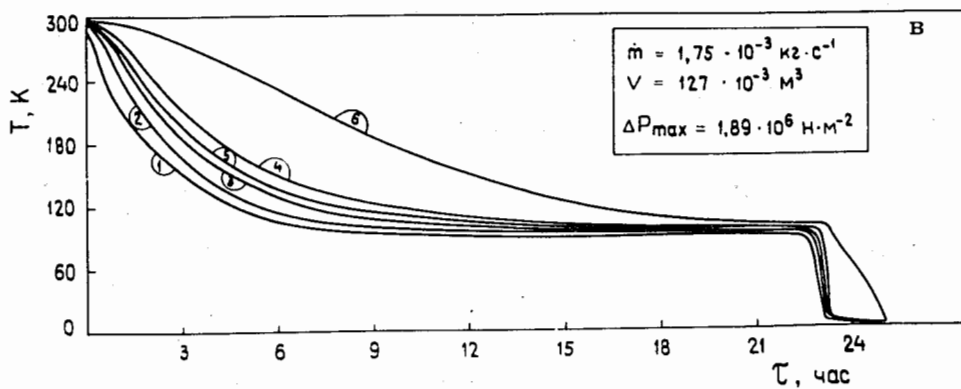
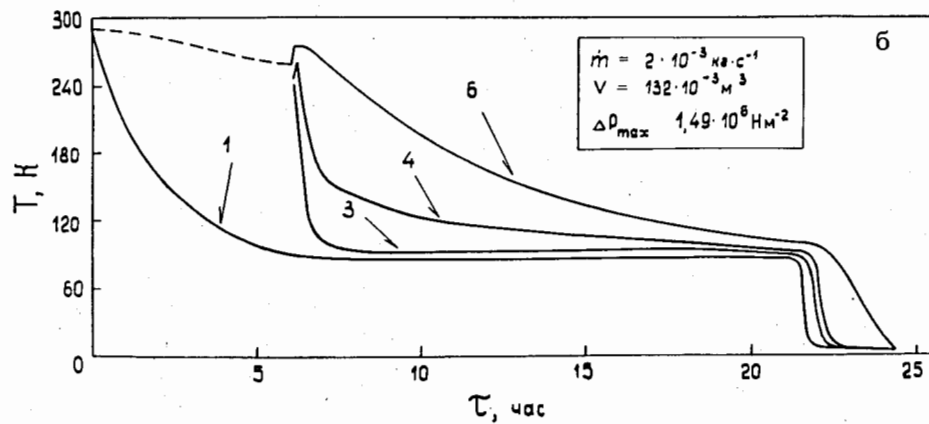
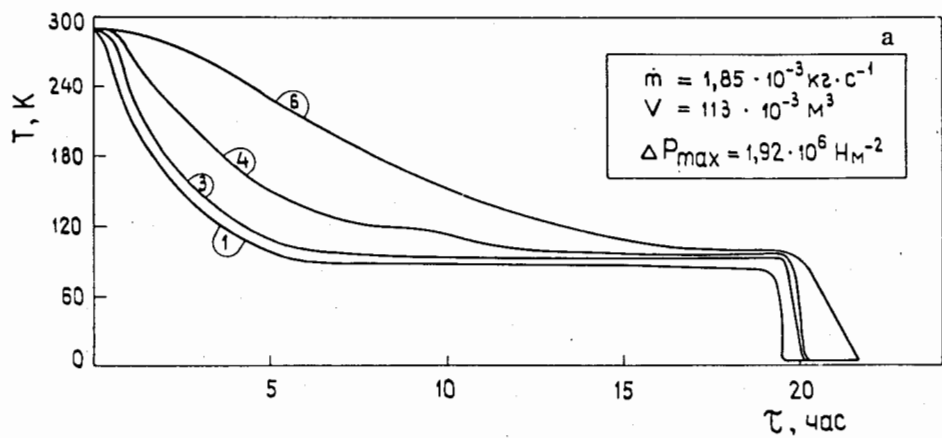


Рис.2. Зависимость температуры в точках ① – ⑥ от времени для одиночного магнита: \dot{m} – массовый расход гелия, проходящего через магнит; V – количество жидкого гелия, затраченное на охлаждение магнита; ΔP_{\max} – максимальное значение потерь давления в магните, $\text{Н}/\text{м}^2$. а, б – питающий коллектор отсутствует. - - - $\dot{m} = 0$.

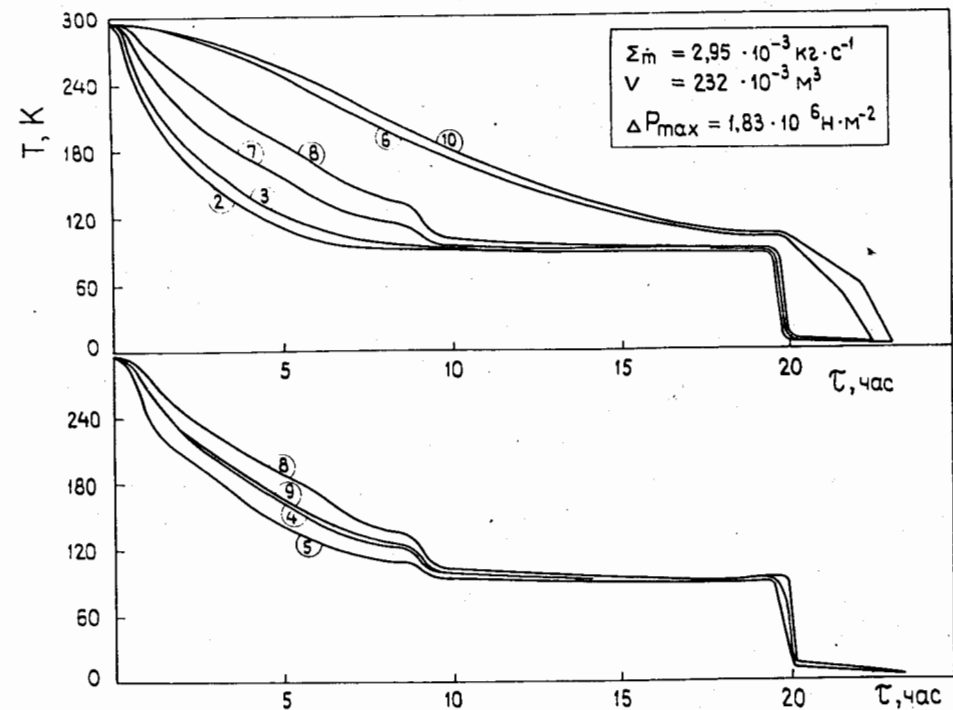
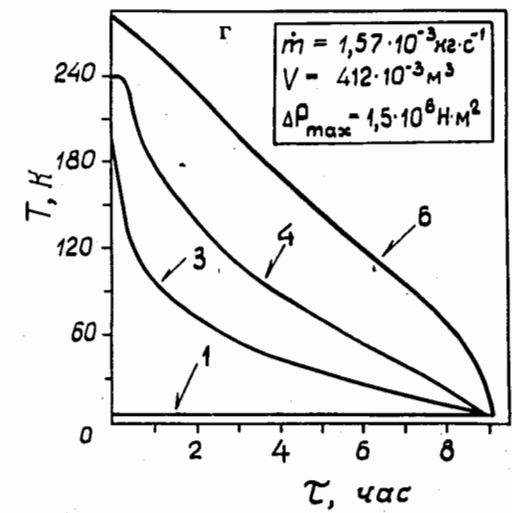


Рис.3. Зависимость температуры в точках ② – ⑩ от времени для цепочки из двух магнитов: $\Sigma \dot{m}$ – суммарный массовый расход гелия, проходящего через два магнита; V – количество жидкого гелия, затраченное на охлаждение двух магнитов; ΔP_{\max} – максимальное значение потерь давления в магнитах, $\text{Н}/\text{м}^2$.

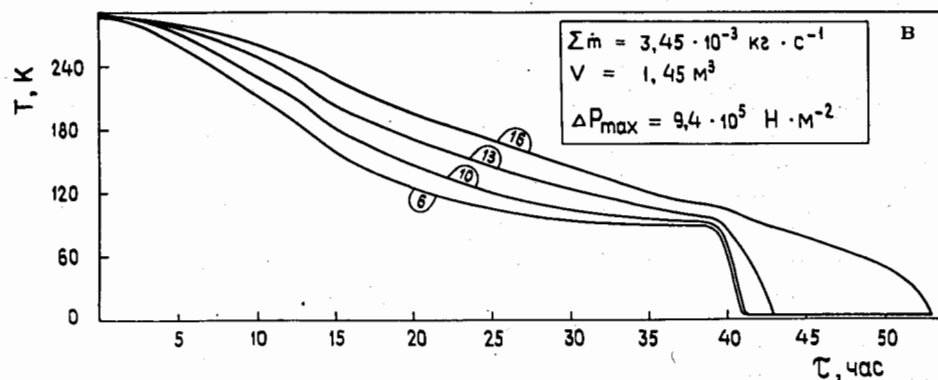
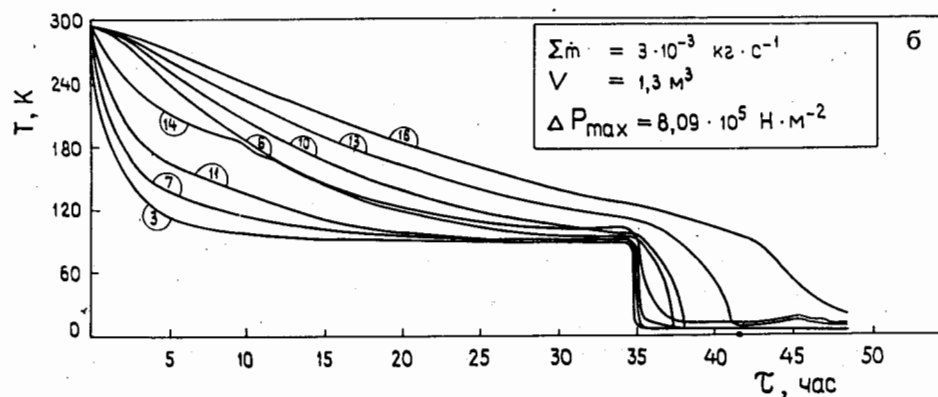
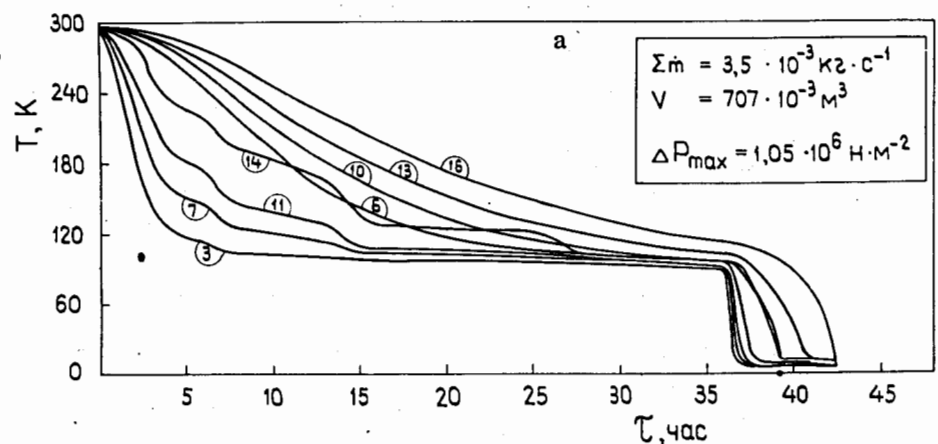
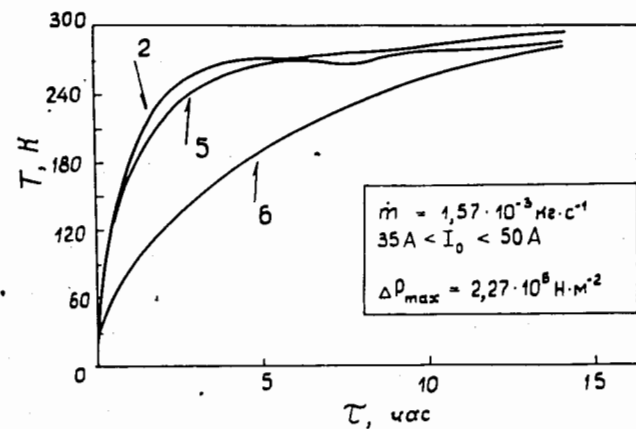


Рис.4. Зависимость температуры в различных точках от времени для цепочки из четырех магнитов. $\Sigma \dot{m}$ — суммарный массовый расход гелия, проходящего через четыре магнита; V — количество жидкого гелия, затраченное на охлаждение четырех магнитов; ΔP_{\max} — максимальное значение потерь давления в магнитах, Н/м^2 .

Рис.5. График отогрева одиночного магнита: \dot{m} — расход гелия через магнит; I_0 — значение электрического тока в обмотке; ΔP_{\max} — максимальное значение потерь давления в магните, Н/м^2 .



пустить жидкую фазу на вход в указанные магниты и тем самым ускорить процесс охлаждения последнего по ходу гелия магнита. Мощность, введенная в каждый электронагреватель, не превышала 40 Вт.

Результаты исследования процесса отогрева одиночного магнита приведены на рис.5. Для ускорения отогрева* через обмотку пропускался постоянный электрический ток 35 ÷ 50 А. При этом максимальное значение джоулева тепловыделения в магните составило 750 Вт.

Экспериментальные значения потерь давления в магните в интервале температур 300-20 К с точностью ±2% описываются зависимостью

$$\Delta P = -P_0 + \sqrt{P_0^2 + 6,12 \cdot 10^{14} \cdot \dot{m}^{1,75} \cdot T_{\text{ср}}^{1,16}}, \text{ Н/м}^2;$$

где P_0 — абсолютное давление в отводящем коллекторе, Н/м^2 ; \dot{m} — массовый расход гелия через магнит, кг/с ; $T_{\text{ср}}$ — среднее значение температуры гелия в обмотке, К.

Максимальные значения потерь давления в магнитах, измеренные в каждом эксперименте, приведены на рис.2—5.

Авторы благодарны А.М.Донягину, И.А.Елисеевой, Н.О.Черней, Ю.С.Чуркину, а также сотрудникам групп В.В.Крылова и Н.И.Баландикова за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

* Предложено А.А.Смирновым.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baldin A.M. et al – *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1983, v. Ns-30, No.4, p.3247.
2. Смирнов А.А., Ходжибагиян Г.Г. – Препринт ОИЯИ 9-88-344, Дубна, 1988.
3. Смирнов А.А. и др. – Препринт ОИЯИ 9-83-625, Дубна, 1983; *Journal de Physique, Colloque C1, sup. No.1, Tome 45, janvier 1984, p.C1-279.*
4. Дьячков Е.И., Кузичев В.Н., Ходжибагиян Г.Г. – Препринт ОИЯИ P8-84-548, Дубна, 1984; *Proc. of the Tenth Int. Cryogenic Eng. Conf., Helsinki, 1984, p.735.*
5. Донягин А.М., Ходжибагиян Г.Г. – Препринт ОИЯИ P8-86-175, Дубна, 1986; *Proc. of the Eleventh Int. Cryogenic Eng. Conf., Berlin-West, 1986, p.199.*
6. Дацков В.И. – Препринт ОИЯИ 8-83-717, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 марта 1989 года.