

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

97-91

P10-97-91

Н.Н.Агапов, Б.В.Василишин, В.И.Волков, В.М.Горченко,
А.Е.Кириченко, А.Д.Коваленко, И.И.Куликов, С.В.Романов,
Б.Н.Свешников, Г.Г.Ходжибагиян

СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ
ТЕМПЕРАТУР ЭЛЕМЕНТОВ
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО УСКОРИТЕЛЯ
НУКЛОТРОН

1997

Успешное функционирование нуклотрона - сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер [1] - невозможно без надежной системы контроля температур всех его элементов. Магнитная структура нуклотрона, имеющего периметр ~252 м, включает 96 дипольных магнитов длиной 1.5 м каждый, 32 фокусирующие и 32 дефокусирующие квадрупольные линзы длиной по 0.45 м. Система охлаждения [2] нуклотрона состоит из двух подсистем, каждая из которых обслуживается отдельным гелиевым рефрижератором, обеспечивающим охлаждение половины кольца ускорителя (рис.1). Гелий направляется из рефрижератора в криостат, питающий коллектор. К коллектору параллельно подключены охлаждаемые структурные магниты и линзы, а также неструктурные элементы - ускоряющие станции, вводной магнит, узлы измерительного периода и др.

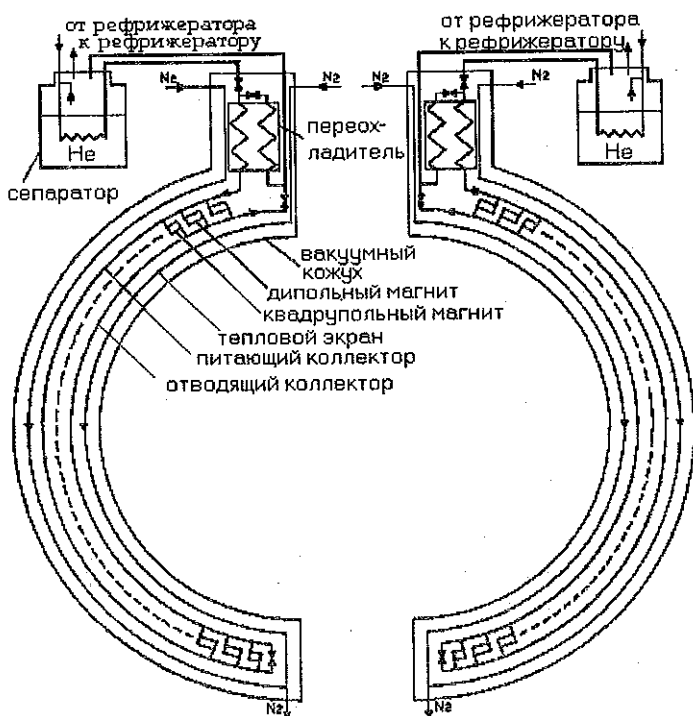


Рис. 1. Структурная схема системы охлаждения нуклотрона

В каждом дипольном и квадрупольном магнитах гелий из питающего коллектора последовательно проходит обмотку, трубку для охлаждения ядра и сбрасывается в

отводящий коллектор. Потоки гелия входят в кольцо нуклотрона в начале третьего и конце второго суперпериодов. В соответствии с этим одна подсистема обеспечивает охлаждение 3-го, 4-го, 5-го и 6-го суперпериодов ("левое" плечо), а вторая - 2-го, 1-го, 8-го и 7-го суперпериодов ("правое" плечо). Каждое плечо включает в себя также азотную магистраль для охлаждения жидким азотом экрана диаметром 490 мм, охватывающего элементы структуры кольца.

Для надежного контроля процесса охлаждения и последующего поддержания эксплуатационного режима необходимо измерять температуру с периодом не более 10 с в трех точках каждого магнитного элемента структуры и измерительного периода, в девяти точках вводного магнита, а также в двух точках большинства неструктурных элементов. Для измерения температуры азотного экрана предусмотрено 10 термометров, из которых 8 установлено в криостатах линз 7Д1, 7Ф2, 8Д4 и магнита 5М4В (по 2 термометра на элемент) и по одному - для контроля температур азотных экранов измерительных периодов "правого" и "левого" плеч криогенной системы кольца нуклотрона. Температурные датчики в магнитных элементах установлены на входах гелия в обмотку и охлаждающую яро трубку, а также на входе гелия в отводящий коллектор. В неструктурных элементах датчики, как правило, расположены на входе и выходе гелия из элемента. Большое суммарное количество точек контроля температур (более 600), удаленность датчиков от измерительной аппаратуры на значительные расстояния (50-100м) и их расположение вблизи источников сильных электромагнитных наводок (ускоряющие станции, электротехнические агрегаты, системы высокочастотного питания линейного ускорителя и др.) накладывают жесткие требования к измерительным трактам, связанные, прежде всего, с их повышенной помехозащищенностью. В начале процесса охлаждения, когда охлаждаемые элементы ускорителя имеют комнатную температуру (~ 290 К), допустимой является погрешность измерения около 1 К. По мере приближения температуры элементов к эксплуатационным значениям (~ 4.5 К), требование к точности измерений повышается и составляет 0.05 К.

В качестве датчиков температуры используются исследованные и предложенные в ЛВЭ [3] криогенные термометры на основе серийного

резистора ТВО. Номинальные значения сопротивлений используемых нами резисторов выбраны в пределах 1 кОм.

Зависимость температуры резистора от измеренного значения сопротивления представляется в виде полинома 7-й степени

$$T = \sum_{n=0}^7 C_n (R_0 / R)^n, \quad (1)$$

где R - измеренное сопротивление термометра, $R_0 = 1000$ Ом, C_n - коэффициенты, определяемые по точкам градуировки методом наименьших квадратов. Для интерполяции по формуле (1) в интервале температур 4 - 300 К с точностью выше 0.5 % необходимо использовать не менее 8 точек градуировки сопротивления термометра, равномерно расположенных в указанном интервале температур [4].

Все температурные датчики нуклотрона соединены так, что образуют 10 измерительных цепей, в каждую из которых подается ток 10 мкА от отдельного источника. При таких значениях тока нагревом резисторов можно пренебречь. Источники тока выполнены в стандарте КАМАК. В блоке единичной ширины размещаются четыре изолированных источника тока. Гальваническая развязка осуществляется с использованием трансформаторов. Выходное сопротивление источника (динамическое) составляет 10^{11} Ом, диапазон сопротивлений нагрузки 1 - 500 кОм.

Структурная схема одной из десяти измерительных цепей показана на рис. 2. В каждую цепь входят 60 последовательно соединенных терморезисторов и 4 прецизионных тестовых резистора с предварительно измеренными с высокой точностью значениями сопротивления. Восемь цепей образуют температурные датчики, установленные в структурных элементах каждого из восьми суперпериодов. В девятую цепь включены датчики, установленные на участке ввода гелия, в элементах измерительного периода, а также в инфлекторном магните. В 10-ю цепь входят термометры неструктурных элементов и азотных экранов.

Система измерения и контроля температур элементов нуклотрона создана на базе компьютера повышенной надежности типа Industrial PC фирмы Advantech, включенного в локальную вычислительную сеть ускорительного комплекса. Измерительная и вспомогательная электронная аппаратура выполнены в стандартах PC и КАМАК и расположены в типовом

домике для физических экспериментов (концентратор данных) в центре ускорительного зала корпуса N1 на расстоянии ~ 50 м от температурных датчиков.

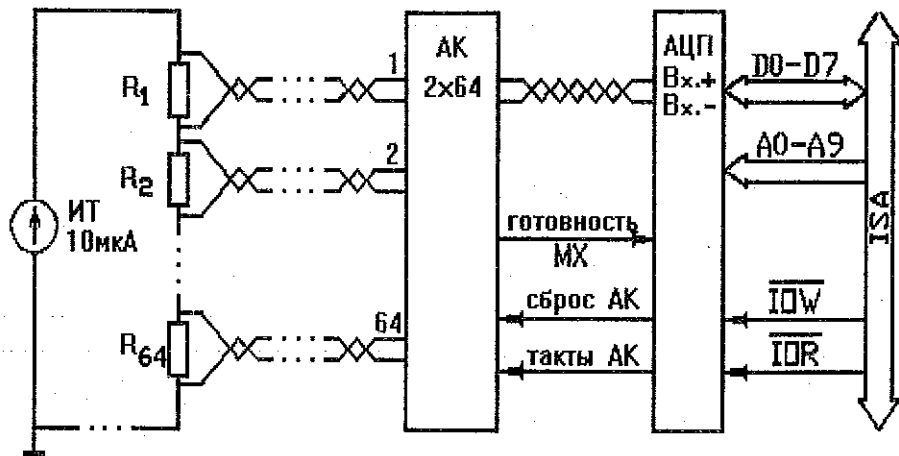


Рис.2. Структурная схема отдельной измерительной цепи

Компьютер с монитором и выдвижной клавиатурой, два крейта с активной и пассивной аппаратурой КАМАК, а также кабельная сборка размещены в стандартной стойке Опытного производства ОИЯИ. Крейт с активной аппаратурой КАМАК подключен к ЭВМ через крейт-контроллер КК-ПК. Оцифровка сигналов от термодатчиков осуществляется с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) интегрирующего типа AD1170 фирмы Analog Devices. На основе указанных АЦП нами разработаны в стандарте РС и используются два типа измерительных модулей - на 4 и 8 каналов измерения. Конструкция используемой аппаратуры позволяет устанавливать в компьютер до 12 подобных модулей. Бортовые процессоры AD1170 дают возможность программно задавать разрядность АЦП от 12 до 24 и время интегрирования 1, 10, 16.666, 20, 100, 166.667 и 300 мс. Нами используются 15 разрядов плюс знак и время интегрирования 20 мс.

Сигналы от термодатчиков в диапазоне уровней 10 - 50 мВ в каждой измерительной цепи по помехозащищенным кабелям подаются на дифференциальные входы 64 канальных аналоговых коммутаторов, имеющих на выходе инструментальные масштабирующие усилители с коэффициентом передачи 100.

Амплитуды сигналов помех при этом соизмеримы с уровнями полезных сигналов. Усиленные сигналы в диапазоне амплитуд 0 - 5 вольт поступают на входы соответствующих каналов AD1170.

Для сокращения общего времени измерений применен следующий алгоритм функционирования АЦП совместно с соответствующими коммутаторами. Каждый цикл измерений начинается с программной инициализации коммутаторов, вызывающей в каждом из них установку 1-го канала. По окончании этапа инициализации производятся последовательные ожидания готовностей коммутаторов и запуски соответствующих АЦП. Запуск последнего 10-го АЦП завершается переходом к ожиданию конца преобразования 1-го, которое длится около 20 мс. После оцифровки сигнала первым АЦП производится считывание и буферизация полученного значения в памяти компьютера. Затем осуществляется инкрементирование очередного канала 1-го коммутатора и переход к ожиданию конца преобразования следующего АЦП и т.д. Так как оцифровка сигналов всеми десятью АЦП происходит параллельно, то состояние их готовностей возникает почти одновременно и считывание данных, соответствующих одинаковым номерам каналов коммутаторов, осуществляется практически без потерь времени на ожидания готовностей АЦП и коммутаторов. Описанная выше процедура для каждой пары коммутатор - АЦП повторяется 64 раза, и весь процесс измерений при этом лишь немного превышает 1.28 с (20 мс x 64) и составляет ~ 1.4 с.

Математическое обеспечение задачи включает в себя две программы. Одна из них осуществляет измерения, контроль параметров криогенной системы, обработку и отображение информации, а также архивирование данных в каждом цикле ускорителя на диске сервера. Вторая программа позволяет просматривать как архивную, так и текущую информацию с любых компьютеров, включенных в локальную вычислительную сеть нуклотрона.

Программа измерений может работать в различных режимах. Установка и смена режимов работы производится в диалоге с использованием клавиатуры компьютера с помощью специальных переносных кнопочных панелей, подключенных к компьютеру через входной регистр, а также с любого компьютера, подключенного к локальной вычислительной сети нуклотрона. Работа измерительной программы инициализируется приходом на параллельный входной регистр (ПВР) импульса конца активной части цикла магнитного поля ускорителя, после чего выполняются измерения и считывание измеренных значений из АЦП.

Эта фаза работы занимает 1.4 с, что позволяет выполнить измерения за время паузы между циклами и тем самым уменьшить или полностью исключить наводки, вызываемые высокочастотной ускоряющей системой нуклотрона. Как уже упоминалось выше, в цепь каждого из 10-ти источников тока включены последовательно с термодатчиками четыре прецизионных калибровочных резистора. Используя известные значения сопротивлений двух из них и соответствующие им показания АЦП, получаем в каждом цикле измерений для каждой из 10-ти измерительных цепей коэффициенты К и Р калибровочных прямых

$$r = K * a + P, \quad (2)$$

где а - показания АЦП, r - известные значения сопротивлений тестовых резисторов. По полученной калибровочной прямой каждому измеренному значению АЦП ставится в соответствие величина сопротивления резистора. При этом степень совпадения измеренных сопротивлений двух тестовых резисторов, не участвовавших в калибровке, с их известными точными значениями сопротивлений служит критерием точности измерений.

Наряду с этим режимом ("автокалибровка") предусмотрен режим, в котором константы К и Р прямой (2) определяются не из измерений сопротивлений тестовых резисторов, а задаются отдельно для каждого терморезистора. После измерения сопротивлений по формуле (1) вычисляются температуры для всех терморезисторов. Режим измерения с автокалибровкой нами используется, как правило, во время сеанса работы нуклотрона, а без автокалибровки производится комплексная настройка аппаратуры перед сеансом.

Контроль температур после охлаждения кольца заключается в проверке всех измеренных значений на превышение допустимого уровня 9 К для гелиевых структур (температура перехода сверхпроводящих обмоток магнитных элементов в нормальное состояние) и 90 К для азотных (температура азотных экранов, превышение которой сигнализирует о недостаточном расходе азота на охлаждение). Любое превышение температуры вызывает появление звукового и светового сигналов, а также команды на блокировку цикла.

Для получения оптимального режима охлаждения и его поддержания в течение всего сеанса работы ускорителя важно также знание некоторых параметров системы криогенного обеспечения. К ним относятся давление гелия в прямом и обратном потоках правого и левого полуколец криосистемы, перепады

этих давлений, уровни гелия в двух сепараторах и сосудах Дьюара криогенных рефрижераторов КГУ-1 и КГУ-2, давление и уровень азота в танке. Оперативное измерение перечисленных параметров также производится в рамках системы термометрии. Подробное описание датчиков уровней и давлений с аппаратурой предварительной обработки сигналов будет дано в отдельной публикации. Сигналы от датчиков по помехозащищенным кабелям длиной ~50 м транспортируются в концентратор данных и подаются на входы разработанного нами блока АЦП-13, совмещающего в себе аналоговый дифференциальный коммутатор на 64 канала и 14-разрядный АЦП интегрирующего типа с временем преобразования 100 мс и буферной памятью 16 К слов.

Полученные данные после каждого цикла измерений записываются в файл текущей информации на диск сетевого сервера, расположенного в помещении центрального пульта управления нуклотрона на расстоянии ~400 м от измерительной аппаратуры. Этот файл, длина которого составляет 1336 байтов, доступен для чтения с любого компьютера локальной вычислительной сети нуклотрона и обновляется каждый цикл измерений. Кроме того, каждые 30 минут происходит запись этой информации в архивный файл диска сервера, также доступный для чтения с удаленных компьютеров.

В программе предусмотрен специальный режим работы - режим экспресс-опроса. В этом режиме измерения производятся лишь для заданного в диалоге набора (но не более 10) терморезисторов. При этом непрерывно опрашиваются только указанные терморезисторы, и измеренные температуры представляются в графическом виде как функция времени от начала экспресс-опроса. При выходе из этого режима полученная информация может быть сохранена по требованию в отдельном файле для ее последующего просмотра. Указанный режим чрезвычайно важен при исследовании процессов перехода сверхпроводящих обмоток отдельных магнитных элементов в нормальное состояние, а также при настройке датчиков нормальной фазы и систем эвакуации запасенной в магнитных элементах энергии.

Рис.3 иллюстрирует использование режима экспресс-опроса при изучении процесса перехода обмотки 1-го дипольного магнита измерительного периода правого плеча в нормальное состояние, искусственно вызванного подогревом обмотки специальным подогревателем. Время теплового воздействия в эксперименте было ~ 10 с.

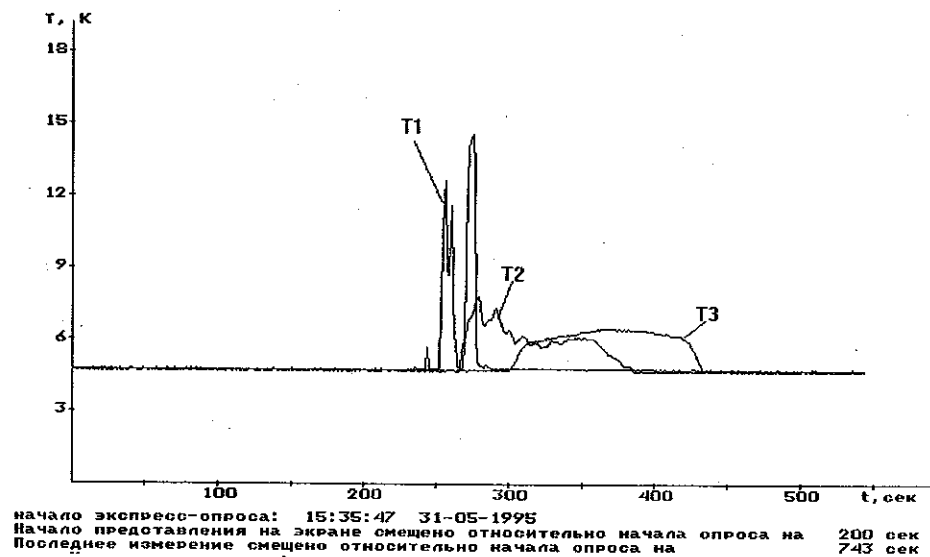


Рис.3 Изменение температур разных частей дипольного магнита измерительного периода при локальном подогреве обмотки

Как видно из рисунка, первым по времени почувствовал повышение температуры датчик T1 (вход гелия в обмотку), непосредственно после которого установлен подогреватель. Зафиксированные резкие скачки температуры на этом датчике свидетельствуют о локальных переходах жидкого гелия (испытания проводились через 4 суток с момента начала охлаждения, когда охлаждающий гелий использовался уже в жидком виде) в более теплое парообразное состояние. Следующее по времени повышение температуры зафиксировано на датчике T2 (вход гелия в охлаждающую ядро трубку) и с наибольшей задержкой это повышение зафиксировано на датчике T3 (выход гелия из элемента), где из-за тепловой инерции изменения температуры максимально сглажены.

По завершении вычислений и записи данных на диск сервера полученная информация отображается на экране измерительного компьютера, а с помощью интерфейса ИЦТМ-01 - на цветном телемониторе концентратора данных. Кроме того видеосигналы с дополнительных выходов ИЦТМ-01 с помощью специальных блоков размножаются и передаются всем заинтересованным службам

ускорительного комплекса для воспроизведения на телемониторах. Реализованы следующие варианты представления информации на экранах телемониторов:

- таблица измеренных значений температур элементов 1 - 4 октантов нуклотрона;
- таблица измеренных значений температур элементов 5 - 8 октантов;
- таблица измеренных значений температур элементов измерительного периода;
- распределение температур всех элементов нуклотрона в виде гистограммы;
- автоматическое чередование перечисленных вариантов с периодом 2 цикла измерений.

Для управления отображением информации на экране измерительного компьютера используется система диалоговых меню. По умолчанию выдаются графики изменения температур в шести наиболее важных точках левого плеча криогенной системы для 72 часов от начала измерений. Цена всей шкалы температур при этом задана 300 К. Диалоговые средства позволяют удобно модифицировать указанные параметры представления информации в процессе работы программы. Для каждого из двух плеч криогенной системы предусмотрены стандартные наборы термометров, регистрирующих температуру наиболее важных элементов. Предоставляется возможность выбора либо одного из двух указанных наборов, либо формирование выдачи графиков для любых (но не более 10) термометров.

Диалоговые средства позволяют инициировать также режим экспресс-опроса и принудительную запись измеренных данных в архивный файл.

Во время работы измерительной системы и особенно в период настройки аппаратуры часто возникает необходимость выдачи на экран измеренных данных в виде сопротивлений термометров и считанных из АЦП значений сигналов, задание (включение/отмена) режима калибровки. Эти услуги также реализованы программой в рамках диалога.

В эксплуатационном режиме полное время измерений, обработки данных с последующей передачей и записью на диск сервера и представления информации составляет ~ 5 с.

Как отмечалось выше, программа просмотра термометрической информации может быть запущена с любого компьютера локальной сети нуклотрона. При работе эта программа берет информацию с диска сервера из файла текущих данных или архивных файлов, причем, в отличие от измерительной программы для оперативного просмотра доступными являются и архивные данные всех

предыдущих сеансов работы нуклотрона. Диалог ведется как и в измерительной программе с использованием меню. В меню включены дополнительные элементы, позволяющие в отличие от измерительной программы выбирать один из записанных ранее архивных файлов. Просмотровая программа предоставляет в полном объеме все диалоговые услуги измерительной программы за исключением тех, которые связаны непосредственно с работой измерительной аппаратуры и с архивированием информации на диске сервера вычислительной сети нуклотрона.

На рис.4 графически представлено изменение температуры 4-х терморезисторов в течение летнего 1995 г. сеанса работы нуклотрона.

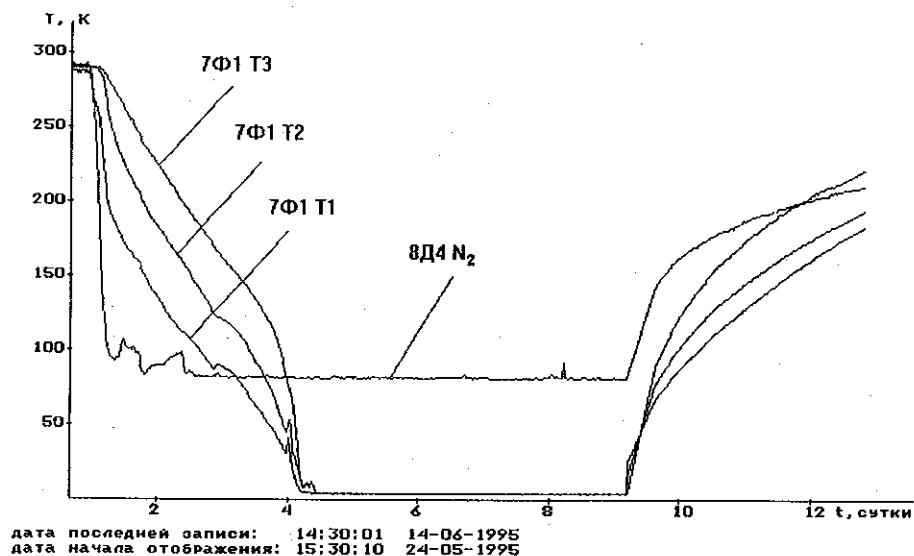


Рис.4. Графики изменения температур структурной линзы 7Ф1 (термометры Т1, Т2, Т3) и азотного экрана линзы 8Д4

На рис.5 показано графически распределение температур элементов кольца нуклотрона через 24 часа после начала охлаждения. За начало отсчета по оси абсцисс выбрана точка инъекции пучка. Как и следует ожидать, наиболее низкие температуры наблюдаются на участке ввода гелия в кольцо (между 2-м и 3-м суперпериодами). Из рисунка также видно отличие в точках, расположенных на входе гелия в обмотку (распределение с наиболее низкими температурами), на входе в охлаждающую ярмо трубку и на входе в отводящий коллектор (наиболее

высокие температуры). Выход на эксплуатационный режим осуществляется, когда температура всех датчиков независимо от их расположения становится практически одинаковой и равной ~ 4.5 K.

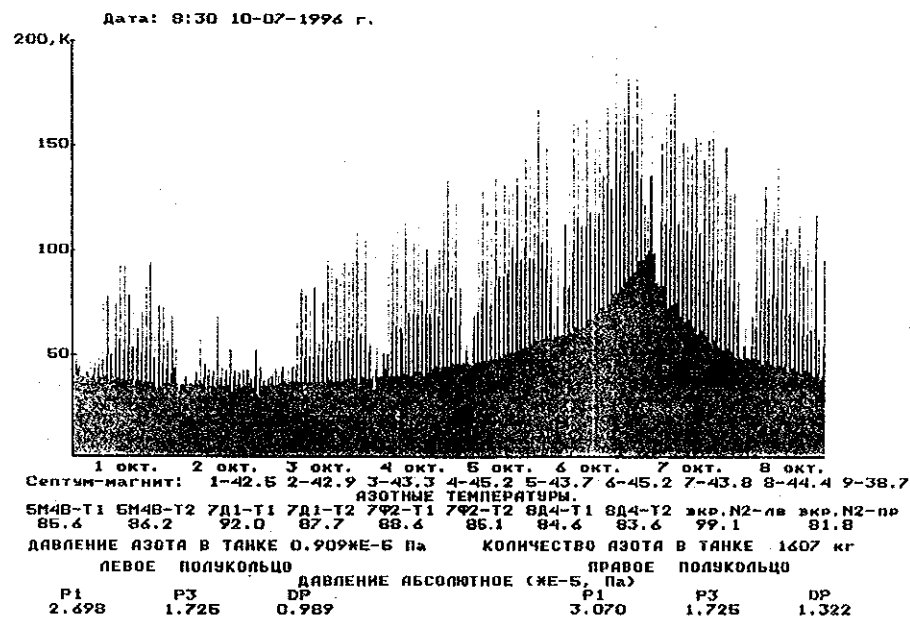


Рис.5. Распределение температур элементов нуклотрона

Рис.6 иллюстрирует вывод данных в числовом виде на экран любого сетевого компьютера или на печатающее устройство для более детального их изучения. На рисунке представлены результаты измерения температур первых четырех октантов (суперпериодов) примерно через сутки после начала охлаждения. Здесь же выдаются температуры инфлекторного магнита во всех 9-ти измеряемых точках, параметры криогенной системы и азотного экрана.

Описанная выше система измерения и контроля температур элементов нуклотрона введена в действие и функционирует с момента первого сеанса охлаждения ускорителя в марте 1993 года. В процессе эксплуатации аппаратура непрерывно совершенствовалась с целью увеличения точности измерений, повышения надежности работы и улучшения сервиса. В современном варианте она используется начиная с летнего 1995 года сеанса работы нуклотрона. Измерения температур элементов нуклотрона, а также архивирование данных о режимах охлаждения производились непрерывно без аварийных остановок измерительной

системы. Накопленный архивный материал позволяет всесторонне анализировать режимы охлаждения и оптимизировать их для сокращения расходов гелия и азота.

Дата: 15:30 25-05-1995 г.

ТЕМПЕРАТУРА ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЬЦА НУКЛОТРОНА														
	1 суперпериод			2 суперпериод			3 суперпериод			4 суперпериод				
Ф1	68.0	116.	202.	94.0	99.8	130.	38.4	64.6	161.	43.0	83.1	151.		
СМ	86.2	91.2	66.4	П3	49.9	44.8	ВП	37.6	99.4	УС1	42.9	44.5		
П1	66.8		69.1	П2	47.9	48.5	ЗБШ	38.2						
Д1	64.8	91.6	191.		47.8	64.8	163.		33.7	39.6	40.1	81.2	65.3	58.7
	ИП	66.7	108.	П4	47.7	49.6		П34.4	42.3	УС1	43.4	43.5		
	ЦФ1	65.0	82.4	140.	П5	47.8	48.0	ВЛ	34.1	50.5				
Ф2	65.6	95.4	200.	46.2	72.1	184.	34.1	49.8	65.8	44.8	77.6	126.		
М2А	65.6	108.	209.	47.5	82.4	201.	34.1	60.3	170.	78.5	66.8	181.		
М2Б	66.2	116.	211.	47.5	90.6	190.	34.4	71.9	185.	45.2	116.	190.		
М2	61.2	148.	220.	43.5	113.	211.	35.5	92.0	194.	45.7	135.	214.		
М2В	64.4	128.	190.	46.4	95.4	192.	35.5	88.8	170.	46.0	127.	187.		
М2Г	62.5	141.	208.	43.5	90.2	195.	35.9	81.8	174.	45.7	128.	198.		
Ф3	60.3	131.	219.	43.7	90.4	205.	36.0	86.9	157.	47.9	139.	215.		
М3А	59.4	140.	205.	43.7	86.1	194.	36.1	90.4	173.	47.3	136.	188.		
М3Б	58.1	132.	207.	43.0	82.3	191.	37.2	103.	186.	50.8	131.	193.		
Д3	57.3	151.	221.	39.3	103.	202.	38.5	113.	204.	52.1	153.	217.		
М3В	58.5	126.	204.	42.3	84.1	196.	37.9	105.	178.	49.9	134.	186.		
М3Г	56.2	133.	210.	42.2	79.6	180.	38.4	104.	187.	53.5	125.	191.		
Ф4	54.0	143.	231.	41.0	100.	224.	39.0	105.	200.	54.4	138.	196.		
М4А	55.6	134.	204.	41.8	100.	186.	40.6	111.	187.	56.2	129.	195.		
М4Б	49.2	119.	205.	38.9	104.	196.	41.0	113.	195.	56.4	132.	201.		
Д4	49.5	124.	216.	35.0	95.5	209.	42.0	130.	211.	57.9	150.	225.		
М4В	52.6	106.	197.	39.9	77.1	182.	39.6	115.	178.	57.9	132.	192.		
М4Г	50.8	92.7	205.	38.9	65.4	191.	44.0	102.	194.	60.4	124.	205.		

Септим-магнит: 1-86.2 2-92.9 3-92.9 4-97.3 5-91.2 6-134. 7-96.6 8-97.8 9-66.4

АЗОТНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ
 БМ4В-Т1 БМ4В-Т2 7Д1-Т1 7Д1-Т2 7Ф2-Т1 7Ф2-Т2 8Д4-Т1 8Д4-Т2 экр.Н2-лв экр.Н2-пр
 108. 107. 123. 123. 137. 136. 101. 100. 109. 104.

ПАРАМЕТРЫ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ					
ЛЕВОЕ ПОЛУКОЛЬЦО			ПРАВОЕ ПОЛУКОЛЬЦО		
КГУ 2 - 0.0 сепаратор - 0.0			КГУ 1 - 0.0 сепаратор - 0.0		
УРОВНИ ГЕЛИЯ (Х), ДАВЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОЕ (ЖЕ-Б, Па)					
Р1	Р3	DP	Р1	Р3	DP
3.109	1.837	1.287	3.443	1.996	1.429

Рис.6. Форма выдачи результатов в числовом виде

ЛИТЕРАТУРА

- Baldin A. M. et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-30, 1983, p. 3247.
- Baldin A. M. et al., Cryogenics of the new superconducting accelerator nuclotron. E8-95-65, Dubna, 1995.
- Дацков В. И., ПТЭ, 1981, N 4, с.253. 4. Дацков В. И. и др., ОИЯИ, 10-81-200, Дубна 1981.
- Дацков В.И. и др., ОИЯИ, 10-81-200, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
 20 марта 1997 года.