

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С 345 Н
А-424

P8 - 8563

1218/2-75

31/11-75

В.Г.Аксенов, Е.Д.Донец, А.Г.Зельдович,
А.И.Пикин, Ю.А.Шишов

КРИОГЕННО-МАГНИТНАЯ СИСТЕМА
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСТОЧНИКА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ("КРИОН")

1975

P8 - 8563

В.Г.Аксенов, Е.Д.Донец, А.Г.Зельдович,
А.И.Пикин, Ю.А.Шишов

КРИОГЕННО-МАГНИТНАЯ СИСТЕМА
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСТОЧНИКА
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ ("КРИОН")

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

S u m m a r y

The construction and test results of the cryomagnetic system of the electron beam multicharged ion source equipped with a superconducting solenoid are described. The length of the solenoid is 1200 mm; coil diameter (average) is 54 mm; maximum induction is 1.35 Tl.

The superconducting magnetic system (SMS) was activated in the persistent current operation mode. A continuous persistent current operation of the SMS was realized for 2 months without a substantial fall of persistent current (<10%).

An essential property of the SMS consists in that its elements are placed under vacuum, and their cooling is performed by means of clapping connections with a cryostat.

It is shown experimentally that such a method of thermostating the SMS is very convenient for designing systems with hard requirements for vacuum conditions, experimental setups and in some other cases.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований создан и успешно прошел стадию наладки криогенный вариант электронно-лучевого источника многозарядных ионов - КРИОН /1/. Принцип действия такого источника подробно рассмотрен в работах /2-4/. Выбор криогенного варианта был обусловлен следующими соображениями.

Схема ускорения ядер на синхрофазотроне ЛВЭ предполагает постановку ионного источника на высоковольтную сторону форинжектора, находящуюся под потенциалом + 500 кВ относительно земли. Питание и управление ионным источником должны осуществляться системами, имеющими тот же потенциал, что и ионный источник. Мощность источника питания на высоковольтной колонне совершенно недостаточна для создания в обычном соленоиде длиной 1 м магнитного поля напряженностью не менее 3 кГс. Применение сверхпроводящего соленоида, работающего в короткозамкнутом режиме, полностью снимает проблему постоянного питания фокусирующего соленоида.

Поверхности, имеющие температуру жидкого гелия, позволяют получать в объеме ионного источника сверхвысокий вакуум.

II. КОНСТРУКЦИЯ КРИОГЕННО-МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ИОННОГО ИСТОЧНИКА

1. Общая схема

Ввиду того, что для работы электронно-лучевого источника требуется постоянное магнитное поле, причем

нет жестких требований к его стабильности, был выбран короткозамкнутый режим сверхпроводящей магнитной системы /СМС/.

Электрическая схема СМС, работающей в короткозамкнутом режиме, представлена на *рис. 1*. Для того чтобы реализовать этот режим в СМС, на перегреватель /1/ подается напряжение от внешнего источника питания, обмотка сверхпроводящей перемычки /2/ нагревается и переходит в нормальное состояние. Затем замыкаются электроды контактора /3/, соединяющие токоведущие шины соленоида /4/ с проводами внешнего источника питания, и на обмотку соленоида /5/ подается напряжение. Ток идет по токоведущим шинам соленоида через спай /6/ на обмотку соленоида. Когда ток через соленоид достигнет нужной величины, снимается напряжение с перегревателя, обмотка перемычки остывает до температуры ниже критической и ток соленоида после выключения источника питания замыкается через перемычку, затем размыкаются электроды контактора.

Общий вид криогенно-магнитной системы электронно-лучевого источника представлен на *рис. 2*.

Сверхпроводящий соленоид /1/, сверхпроводящая перемычка /2/ и промежуточное кольцо /3/, на которое наклеены спай, расположены в вакууме коаксиально с гелиевым криостатом /4/, их корпуса прижаты болтами к торцу последнего. Токоведущие шины соленоида /5/ приклеены через изоляцию к наружной поверхности гелиевого криостата в нижней его части. В правой части токоведущие шины соленоида припаяны к жестким медным шинам /6/, оканчивающимся против подвижных электродов контактора /7/.

Коаксиально с гелиевым расположен азотный криостат /8/. Торцевые радиационные экраны /9/ и /10/, прижатые к нему болтами, снижают теплоприток излучением к частям установки, имеющим гелиевую температуру. Для откачки объема между вакуумным кожухом /11/ и азотным криостатом в торцевых радиационных экранах сделаны отверстия общей площадью 200 см².

Чтобы уменьшить теплоприток излучением к азоту, между цилиндрическими поверхностями азотного крио-

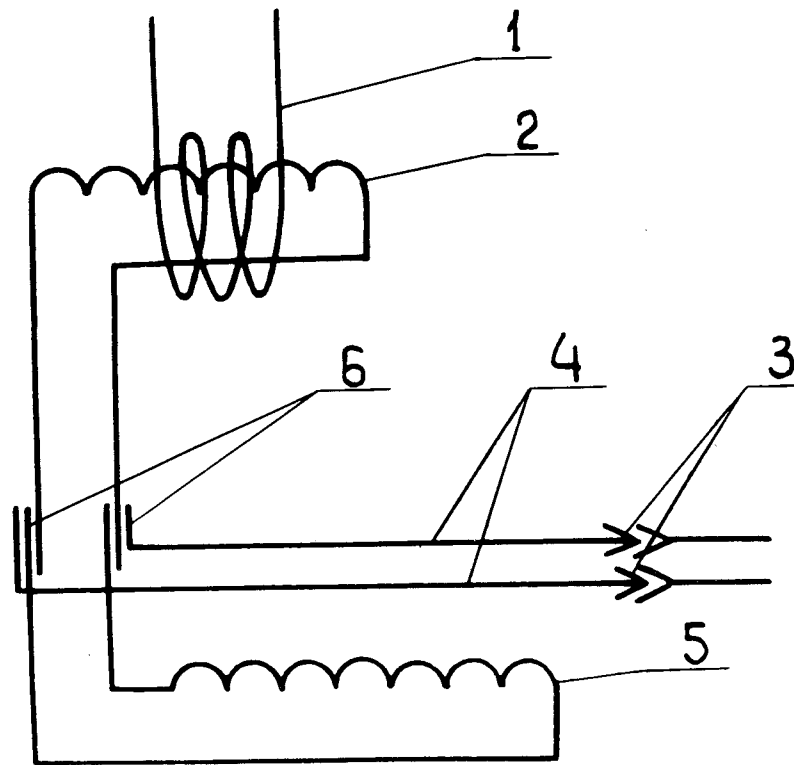


Рис. 1. Электрическая схема сверхпроводящей магнитной системы, работающей в короткозамкнутом режиме.

стата и вакуумного кожуха поставлен "плавающий" экран из полированной меди /12/.

Предварительная откачка установки осуществляется вакуумной системой, включающей в себя форвакуумный насос, диффузионный паромасляный насос и азотную ловушку. Вакуум в объеме между вакуумным кожухом и азотным криостатом измеряется датчиками /13/ с помощью приборов ВИ-14.

2. Фокусирующий соленоид

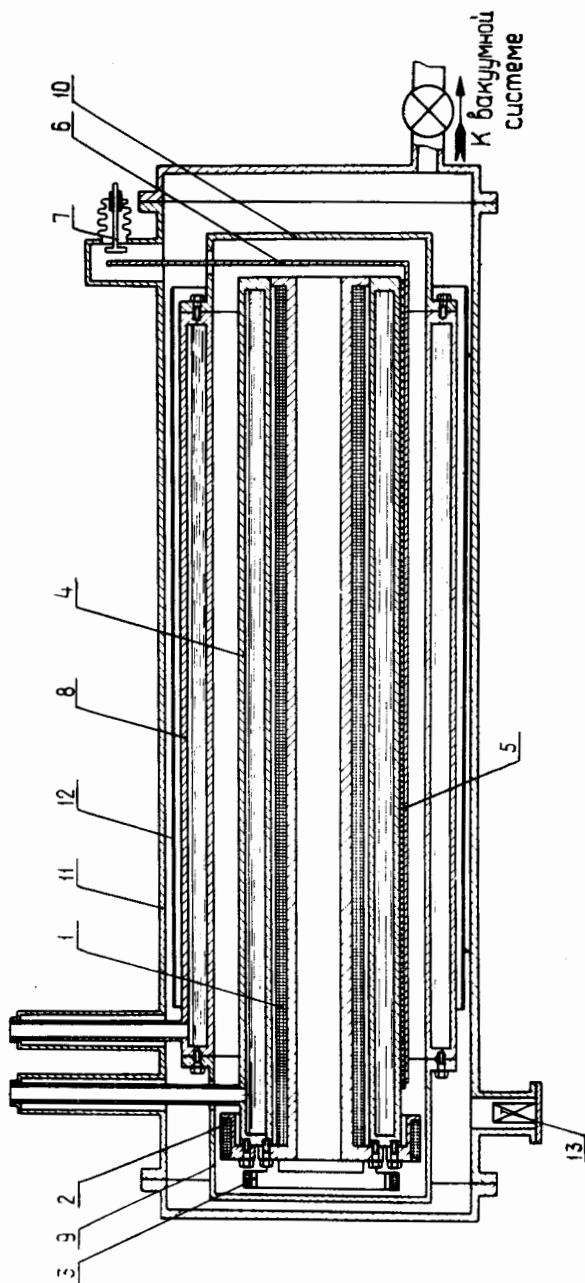


Рис. 2. Общий вид криогенно-магнитной системы электроно-лучевого источника.

Основные параметры фокусирующего соленоида приведены в табл. 1.

Особенностью соленоида является то, что он расположен в вакууме. Не имея непосредственного контакта с жидким гелием, соленоид охлаждается за счет теплопроводности через контакт с гелиевым криостатом. Тепловой контакт обеспечен прижимом фланца корпуса соленоида к торцу гелиевого криостата 12 болтами М6 с общим усилием 2000 кг. Достоинства такого метода термостатирования подробно рассмотрены в работе ^{5/}. Выбор метода термостатирования обмотки соленоида без непосредственного контакта с жидким гелием в нашем случае был обусловлен, в основном, следующими двумя обстоятельствами.

Во-первых, возможность замены соленоида без разгерметизации гелиевого криостата. Такая необходимость могла возникнуть, например, при неудовлетворительном совпадении геометрической оси корпуса соленоида и оси магнитного поля, так как требования к симметрии магнитного поля очень высоки.

Во-вторых, такой метод термостатирования позволяет жестко связать ось системы секций дрейфовой трубки с осью корпуса соленоида.

Обмотка соленоида состоит из 8 слоев сверхпроводящего провода, намотанного с усилием 1 кг. Слои обмотки изолированы друг от друга и от корпуса лавсановой пленкой толщиной 40 мкм. Такая изоляция должна выдерживать напряжения, возникающие при переходе соленоида в нормальное состояние. Сверху обмотка соленоида зафиксирована бандажом, представляющим собой два слоя проволоки из нержавеющей стали диаметром 1 мм, намотанной с усилием в 3 кг.

Расчет времени охлаждения соленоида не производился, так как неизвестна зависимость теплопроводности контактов медь - медь, медь - лавсан и лавсан - лавсан от температуры.

Таблица 1

Параметры фокусирующего соленоида источника КРИОН

Наименование	Величина
Длина обмотки соленоида	120 см
Внутренний диаметр обмотки	5 см
Материал сверхпроводника	НТ-50
Диаметр сверхпроводящего провода без изоляции	0,5 мм
Общая длина сверхпроводника в обмотке соленоида	2550 м
Общее количество витков в обмотке	15000
Индуктивность соленоида	0,54 Г
Напряженность магнитного поля в центре соленоида при токе 80 А	12,8 кЭ
Величина запасенной энергии магнитного поля соленоида при 80 А	1,75 кДж
Площадь поперечного сечения материала корпуса соленоида	10 см ²

3. Токоведущие шины соленоида

Токоведущие шины соленоида представляют собой две комбинированные ленты, приклеенные к гелиевому криостату по всей длине клеем БФ-2, толщина слоя которого равна 0,01 см. Каждая лента состоит из двух участков, спаянных между собой индием. Участок ленты, к которому припаивается жесткая медная шина, оканчивающаяся против подвижного электрода контактора, выполнен из медной фольги толщиной 0,01 см, имеет длину 20 см и ширину 12 см. На этом участке к гелиевому криостату отводится основная часть тепла, идущего по жестким медным шинам во время ввода и вывода тока из соленоида.

Для того чтобы исключить выделение тепла в другом участке токоведущей шины, его выполнили из сверхпрово-

дущей ленты. Материал ленты - станид ниобия (Nb_3Sn), плакированный медью. Ширина ленты 4 см, длина 100 см и толщина 0,005 см. Свойства такой ленты описаны в работе /6/.

Хороший тепловой контакт токоведущих шин с гелиевым криостатом обеспечивает эффективный отвод тепла, выделяющегося во время ввода и вывода тока, так что в месте спая сверхпроводящей ленты с проводом НТ-50, соединяющим токоведущие шины соленоида с проводами обмотки соленоида и перемычки, температура сохраняется ниже критической.

Применение контактора и охлаждение токоведущих шин соленоида за счет контакта с гелиевым криостатом позволили избежать электрических вводов из гелиевого криостата в вакуум.

4. Сверхпроводящая перемычка

Сверхпроводящая перемычка, как и соленоид, расположена в вакууме и охлаждается посредством контакта с гелиевым криостатом. Перемычка переводится в нормальное состояние путем пропускания тока через перегреватель, представляющий собой константановую проволоку, закрепленную на обмотке перемычки. Для обмотки использован многожильный провод НТ-50, диаметр которого без изоляции равен 0,5 мм. Длина провода обмотки 160 м, сопротивление обмотки при 25 К равно 1 Ом. Такое сопротивление выбрано для того, чтобы ослабить требования к величине пульсаций напряжения источника питания соленоида.

Чтобы избежать искажения магнитного поля соленоида полем перемычки, корпус последней изготовлен в виде кольца и размещен концентрически с соленоидом, а кабель намотан бифилярно. Для улучшения теплопроводности пространство между витками обмотки заполнено эпоксидной смолой. Медный корпус перемычки прижат к гелиевому криостату шестью болтами М6 с общим усилием 1000 кг.

Концы обмотки перемычки спаяны с концами обмотки соленоида и концами отрезков провода НТ-50, соеди-

няющим обмотки соленоида и перемычки с токоведущими шинами, индием без оголения сверхпроводящих жил. Каждый из двух спаев имеет длину 150 см.

Для того чтобы избежать нагрева кабеля соленоида теплом, идущим от перемычки при вводе тока в соленоид, участки сверхпроводящего кабеля, соединяющие обмотку перемычки с обмоткой соленоида, приклеены на длине 60 см к медному промежуточному кольцу, прижатому к гелиевому криостату. К этому же кольцу приклеены упомянутые спаи. Тепловая проводимость моста спаи - гелиевый криостат достаточна для отвода тепла, выделяющегося в спаих, при их температуре ниже критической.

5. Криостаты

Гелиевый и азотный криостаты размещены коаксиально с соленоидом. Объем гелиевого криостата 21 л, азотного - 18 л. С одной стороны криостаты прикреплены на заливных трубках к стаканам, служащим для увеличения длины трубок. С противоположной стороны азотный криостат висит на двух подвесках, закрепленных на вакуумном кожухе, а гелиевый держится на подвесках, закрепленных на азотном криостате. Трубки служат также для заливки жидкого азота и гелия. Они изготовлены из нержавеющей стали, имеют длину 30 см, диаметр 24 мм и толщину стенок 0,5 мм.

Подвески изготовлены из нержавеющей стали. Длина каждой из четырех подвесок 65 мм. Диаметр подвесок для азотного и гелиевого криостатов составляет 2 мм и 1 мм соответственно. Распределение температуры на заливных трубках таково, что после заливки жидкого азота и гелия относительное вертикальное смещение криостатов составляет 0,2 мм.

Минимальная величина зазоров в аксиальном и радиальном направлениях между деталями, находящимися при азотной и гелиевой температуре, составляет 1 мм. Чтобы избежать соприкосновения и деформации этих деталей при охлаждении установки, трубки гелиевого и азотного криостатов и сами криостаты охлаждаются одновременно.

Азотный криостат изготовлен из нержавеющей стали, гелиевый - из меди марки МЗР. Медь в качестве материала для гелиевого криостата выбрана для того, чтобы уменьшить тепловое сопротивление между жидким гелием и корпусом соленоида. Кроме того, в медном криостате разность температур между верхней и нижней его частями при малом уровне жидкого гелия минимальна, что существенно для поддержания температуры соленоида на уровне 4,2 К.

С учетом возможности резкого повышения давления при интенсивном испарении жидкого гелия в аварийных режимах, гелиевый криостат рассчитывался на прочность при давлении 20 атм. После изготовления криостат был испытан давлением 18 атм.

6. Теплопритоки

Одним из основных требований при разработке криогенной системы электронно-лучевого источника было обеспечение минимальных теплопритоков к жидкому гелию и азоту. Оно вызвано необходимостью непрерывной работы источника без остановки ускорителя в течение нескольких суток. Короткозамкнутый режим работы СМС позволил свести теплоприток к жидкому гелию до минимума, так как в этом режиме отсутствует постоянный теплоприток по проводам, соединяющим соленоид с внешним источником питания. Расчетные величины теплопритоков по основным каналам приведены в табл. 2.

Точный расчет теплопритоков по заливным трубкам не производился. Согласно имеющимся литературным данным [7,8], эти теплопритоки в нашем случае очень малы.

Для уменьшения теплопритоков излучением противоположные поверхности, находящиеся при разных температурах, полировались или покрывались слоем алюминированного лавсана. С той же целью между вакуумным кожухом и азотным криостатом поставлен "плавающий" экран, изготовленный из тонкого медного листа, полированного с двух сторон.

Таблица 2
Теплопритоки к жидкому гелию и азоту

Каналы теплопритоков	К жидкому гелию /Вт/	К жидкому азоту /Вт/
Излучением	0,034	5,70
По подвескам	0,009	0,25
По электрическим вводам	0,22	0,34
Общий расчетный теплоприток	0,065	6,29
Измеренный теплоприток	0,125	9,9

7. Измерение температуры и уровня жидкого гелия

Температурные датчики установлены на бандаже соленоида и на корпусе переключки. В диапазоне /300-78/К температура измеряется с помощью терморезисторов медь-константан, в диапазоне /78-4,2/К - с помощью угольных резисторов.

Уровень жидкого гелия измеряется сверхпроводящим уровнемером, разработанным в криогенном отделе ЛВЭ. Есть возможность косвенного измерения уровня жидкого гелия по показаниям газового счетчика, стоящего на линии обратного потока гелия.

III. ИСПЫТАНИЯ КРИОГЕННО-МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

В процессе испытаний криогенно-магнитной системы электронно-лучевого источника были получены следующие результаты.

1. Через три часа после начала предварительной откачки вакуум в установке составлял $P = 1 \cdot 10^{-2}$ Тор, натекание $Q = 5 \cdot 10^{-3}$ Тор.л/сек. В процессе откачки натекание падает и давление уменьшается.

2. Охлаждение установки до температуры -79 К производится следующим образом. Жидкий азот через трубку сифона подается в гелиевый криостат. Пары азота, выходящие из заливной трубки гелиевого криостата, направляются в азотный криостат. При этом охлаждаются одновременно оба криостата и обе заливные трубки. Охлаждение гелиевого криостата и соленоида ведется до температуры 79 К, после чего азот заливается в азотный криостат.

После охлаждения установки и заливки жидкого азота в азотный криостат, в ней достигается вакуум $P = 1 \cdot 10^{-6}$ Тор, натекание газов, не конденсирующихся на азотных поверхностях, составляет $Q = 1 \cdot 10^{-6}$ Тор.л/сек. Операция охлаждения гелиевого криостата и соленоида до азотной температуры обычно занимает 4-5 час.

3. Охлаждение гелиевого криостата и соленоида от азотной до гелиевой температуры при оптимальном режиме занимает около двух часов. Экспериментальные кривые охлаждения соленоида приведены на рис. 3. Обычно на охлаждение и заполнение гелиевого криостата требуется 50 л жидкого гелия.

4. Вакуумная система отключается от установки в процессе охлаждения, когда температура гелиевого криостата достигнет 20 К. Сразу после заливки жидкого гелия давление в области манометрических датчиков становится равным $P = 1 \cdot 10^{-8}$ Тор. В течение всего времени работы установки /до 60 сум/ давление в области манометрических датчиков постоянно уменьшалось и достигало величины $P = 3 \cdot 10^{-9}$ Тор.

5. В процессе испытаний СМС в переключку был введен максимальный ток 120 А, в соленоид был введен максимальный ток 90 А. Короткозамкнутый режим в СМС был реализован при максимальном токе 90 А.

6. Затухание магнитного поля в СМС специально не измерялось. За время непрерывной работы в течение 40 сум. было замечено уменьшение тока в СМС с 80 до 75 А.

7. Минимальная мощность нагревателя, при которой переключка переходит в нормальное состояние, составляет

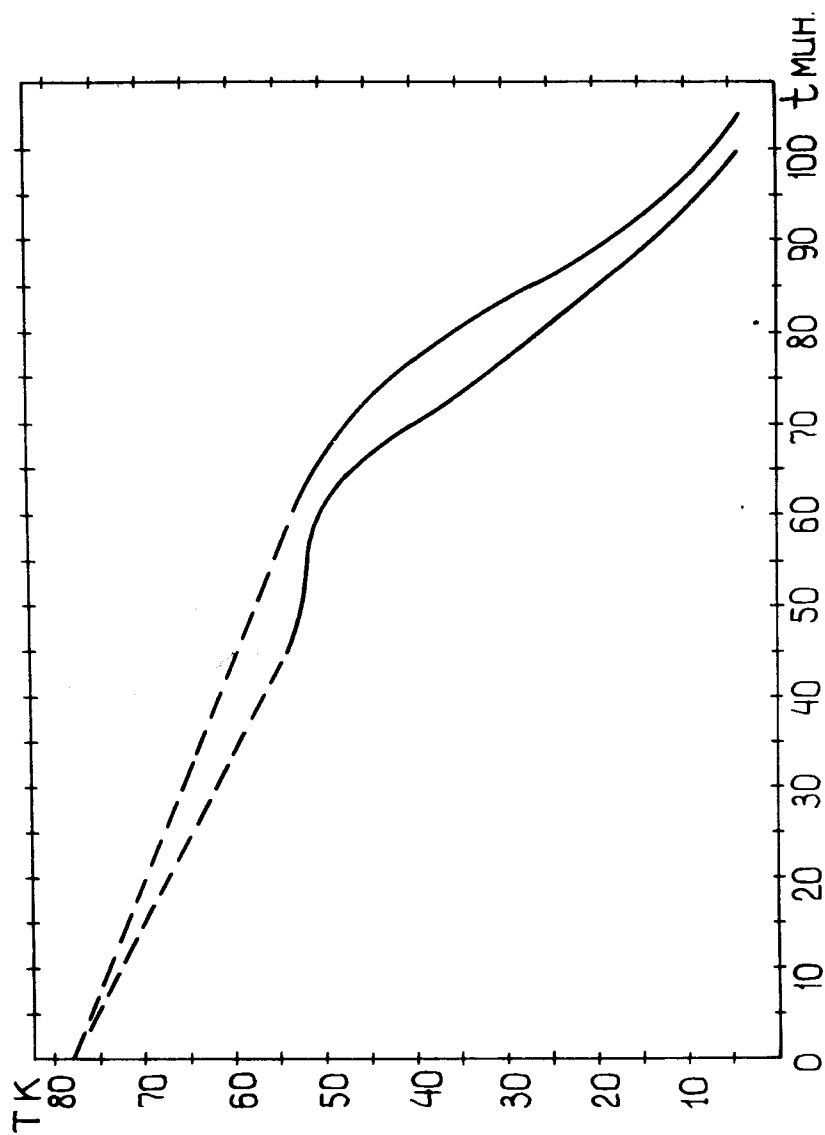


Рис. 3. Зависимость температуры соленоида от времени в процессе охлаждения.

0,5 Вт. Время нагрева перемычки до критической температуры не превышает 5 сек, время охлаждения перемычки после выключения нагревателя не превышает 10 сек. Вся операция ввода тока в соленоид обычно занимает 2 мин, при этом испаряется ~1 л жидкого гелия.

8. За все время экспериментов в соленоид ток вводился 60 раз. При проведении экспериментов соленоид по разным причинам несколько раз переходил в нормальное состояние. Никаких изменений в работе соленоида и перемычки не обнаружено.

9. Испаряемость жидкого азота составляет 224 см³/час, что соответствует мощности теплопритока 9,9 Вт. Жидкий гелий испаряется со скоростью 179 см³/час, мощность теплопритока к нему составляет 0,125 Вт. Отличие измеренных величин теплопритоков от расчетных можно объяснить наличием неполированных участков поверхностей, что увеличивает среднюю величину коэффициента черноты стенок по сравнению с той, что была взята для расчетов. Другая возможная причина - большая величина теплопроводности материалов электрических вводов по сравнению с расчетной.

В заключение мы благодарим сотрудников криогенного отдела: Н.К.Зельдович - за составление общей схемы газовых магистралей криогенной системы, А.И.Калмыкову - за изготовление чертежей пульта управления газовыми потоками, а также Л.Б.Голованова, В.В.Крылова и Х.Менке - за участие в плодотворных дискуссиях.

Мы благодарим также коллектив механических мастерских, успешно справившийся с изготовлением сложных узлов криогенно-магнитной системы ионного источника.

Литература

1. Е.Д.Донец, А.И.Пикин. Сообщение ОИЯИ, Р7-7999, Дубна, 1974.
2. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. Сообщение ОИЯИ, Р7-4124, Дубна, 1968.
3. Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт. Сообщение ОИЯИ, Р7-4469, Дубна, 1969.

4. *Е.Д.Донец, В.И.Илющенко, В.А.Альперт, Е.Д.Воробьев, А.И.Пикин. Материалы международной конференции по физике тяжелых ионов. ОИЯИ, Д7-5769, Дубна, 1971.*
5. *А.Г.Зельдович, Ю.А.Шишов. Сообщение ОИЯИ, 8-7018, Дубна, 1973.*
6. *Н.Г.Анищенко, В.А.Башилов, В.А.Васильев, Б.З.Житников, А.Г.Зельдович, К.П.Кузнецов, Ю.В.Макаров, Н.Н.Полинчик, Ю.А.Шишов. Сообщение ОИЯИ, P8-5440, Дубна, 1970.*
7. *M.Firth. CERN Report, LTL 72.1, 1972.*
8. *М.Г.Казанер. Тепловая изоляция в технике низких температур. Москва, Машиностроение, 1966.*

*Рукопись поступила в издательский отдел
27 января 1975 года.*

Аксенов В.Г., Донец Е.Д., Зельдович А.Г., Пикин А.И., P8 - 8563
Шишов Ю.А.

Криогенно-магнитная система электронно-лучевого источника
многозарядных ионов ("Крион")

Описаны конструкция и результаты испытаний криогенно-магнитной системы электронно-лучевого источника многозарядных ионов со сверхпроводящим соленоидом. Показана работоспособность сверхпроводящей магнитной системы, все элементы которой находятся в вакууме, а охлаждение производится через контактные прижимные соединения с криостатом.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований
Дубна 1975

Aksenov V.G., Donetsk E.D., Seldovich A.G., P8 - 8563
Pikin A.I., Shishov Yu.A.

Cryomagnetic System of the Electron Beam
Multicharged Ion Source

See the Summary on the reverse side of the title-page.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research
Dubna 1975