

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Б-825

21/3-77

13 - 10253

1032/2-77

Н.С.Борисов, Э.И.Бунятова, Ю.Ф. Киселев,
В.Н.Матафонов, Б.С.Неганов, Ю.А.Усов

ПРОТОННАЯ ПОЛЯРИЗОВАННАЯ
"ЗАМОРОЖЕННАЯ" МИШЕНЬ

Часть I. Общие принципы и конструктивное
исполнение

1976

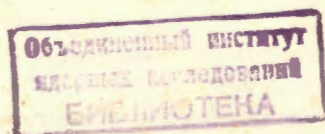
13 - 10253

Н.С.Борисов, Э.И.Бунятова, Ю.Ф. Киселев,
В.Н.Матафонов, Б.С.Неганов, Ю.А.Усов

**ПРОТОННАЯ ПОЛЯРИЗОВАННАЯ
"ЗАМОРОЖЕННАЯ" МИШЕНЬ**

**Часть I. Общие принципы и конструктивное
исполнение**

Направлено в ПТЭ



Протонная поляризованная "замороженная" мишень.

Часть I. Общие принципы и конструктивное исполнение

Описана поляризованная "замороженная" мишень, в которой динамическим методом достигается максимальная поляризация протонов $P_{\pm} = 98 \pm 2\%$ в пропандиоле, содержащем Cg^V , при температуре 0,3К и поле 26,9 кГс. Достигнутая высокая поляризация может быть сохранена ("заморожена") в более слабом (≈ 10 кГс) магнитном поле при температуре 0,035 К.

Рассматриваются общие принципы работы "замороженной" мишени. Дается описание ее конструктивного исполнения. Приводятся характеристики криогенной аппаратуры, полученные в реальных условиях ядерного эксперимента.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований

Дубна 1976

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ с октября 1975 года на пучке синхроциклотрона действует поляризованная протонная "замороженная" мишень. К настоящему времени на мишени проведена серия сеансов по измерению S_{pp}^{pp} в упругом $p-p$ -рассеянии ^{1/}. В данной работе рассматриваются общие принципы работы "замороженной" мишени. Дается описание ее конструктивного исполнения. Приводятся характеристики криогенной аппаратуры, полученные в реальных условиях ядерного эксперимента.

"Замороженная" поляризованная протонная мишень является, в некоторой степени, новым прибором для ядерных исследований и отличается от обычной поляризованной мишени тем, что высокая степень поляризации мишени, достигнутая с помощью динамического метода, поддерживается в дальнейшем за счет охлаждения мишени до температуры ниже 0,1К. "Замораживание" неравновесной поляризации обусловлено значительным возрастанием времени спин-решеточной релаксации ядер при сверхнизких температурах. Это позволяет прекращать динамическую поляризацию и во время экспозиции мишени в эксперименте сохранять ее стабильное значение $\sim 100\%$ в более слабом и менее однородном магнитном поле по сравнению с тем, которое требуется для динамической поляризации.

Основное преимущество "замораживания" связано с возможностью применения магнитных полей различного типа для достижения поляризации и экспозиции мишени

на пучке. Прежде всего это выражается в том, что противоречивые требования высокой однородности поля в большом объеме и большой апертуры для регистрации вторичных частиц могут быть разделены так, что этим требованиям удовлетворяют либо два магнита порознь, либо один магнит с изменяющимися параметрами. В любом случае магнитная система становится более простой и менее дорогостоящей, чем в мишени с непрерывной динамической поляризацией.

Впервые идея создания "замороженной" мишени была высказана в работах /2,9/ в связи с появлением нового метода глубокого охлаждения вещества - путем растворения ^3He в ^4He /3/. Однако недостаточная мощность рефрижераторов и отсутствие подходящего вещества для мишени на длительное время затормозили реализацию этой идеи. В дальнейшем благодаря интенсивным работам в области техники метода растворения, а также в области поисков новых веществ для поляризованных мишеней /4, 8, 10/ эти трудности были успешно преодолены.

В рассматриваемом варианте "замороженной" мишени не предусмотрен перевод мишени в магнитное поле иной геометрии, поскольку этого не требовали условия ядерного эксперимента, для которого мишень предназначалась. Разработка данного варианта в большой степени преследовала цель изучения возможностей криогенной аппаратуры в условиях эксперимента на ускорителе и исследования различных характеристик самой "замороженной" мишени для использования этого опыта при проектировании мишени большого объема. Вместе с тем описываемая ниже установка не является только моделью, т.к. достигнутые параметры позволяют использовать ее в ядерных экспериментах с достаточно высокой эффективностью.

КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

Общая схема установки представлена на рис. 1.

1. Криостат. Гелиевый криостат 1 служит для охлаждения катушек сверхпроводящего магнита 2 и для

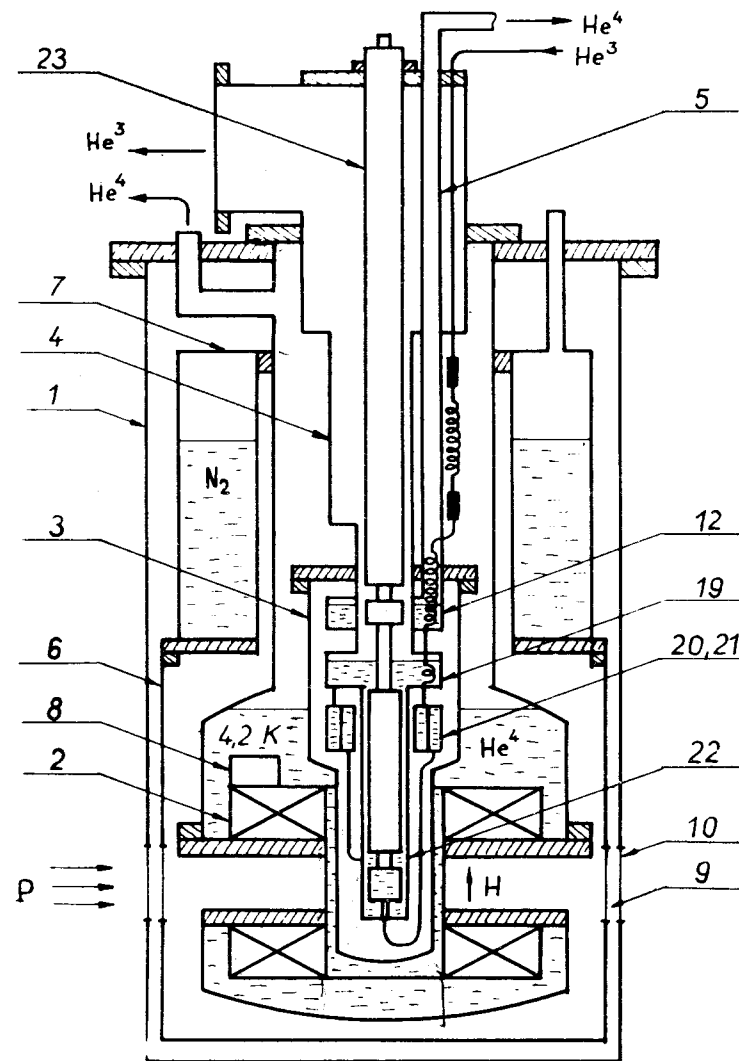


Рис. 1

обеспечения работы ступени растворения 3. Вся низкотемпературная часть рефрижератора растворения, включающая ступень растворения 4 и тракты откачки ^3He и ^4He 5, может быстро демонтироваться и выниматься из криостата для профилактики или ремонта. Экранировка гелиевых емкостей осуществляется негерметичным экраном 6, присоединенным к емкости с жидким азотом 7. Верхняя гелиевая емкость имеет индиевое уплотнение, и, таким образом, открывается доступ к системам управления и контроля сверхпроводящего магнита 8, расположенным над верхней катушкой.

Для уменьшения поглощения вторичных частиц выходное окно 9 в азотном экране выполнено из медной фольги толщиной 20 мкм, выходное окно вакуумного кожуха 10 - из майлара толщиной 200 мкм. Окна имеют раствор 120° в горизонтальной плоскости.

Основные размеры криостата и магнита: наружный диаметр сверхпроводящих катушек - 290 мм, внутренний - 130 мм, высота каждой катушки - 50 мм, зазор для прохода пучка составляет 30 мм, полная высота криостата от верхнего фланца до дна - 1300 мм, диаметр вакуумного кожуха - 400 мм. Объем азотной емкости - 15 л, объем гелиевых емкостей - 16 л, полезный объем гелия - 12 л.

2. Система циркуляции ^3He . Система циркуляции ^3He рефрижератора растворения изображена на рис. 2. Группа насосов, состоящая из диффузионного бустерного насоса БН-2000 /2000 л/с/, ротационного механического насоса RUVAC WS-250 /70 л/с/ и форвакуумного механического насоса ВН-1МГ /18 л/с/, включенных последовательно, обеспечивает молярную скорость циркуляции ^3He в системе вплоть до $5 \cdot 10^{-3}$ моль/с. Для предотвращения загрязнения тракта откачки ^3He маслом от насоса БН-2000 использована охлаждаемая жидким азотом ловушка 1. Поскольку рабочее давление ^3He на входе БН-2000 изменяется в пределах от $4 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-2} мм рт.ст., то специальной изоляции азотной емкости ловушки не предусмотрено.

Большое внимание обращено на систему очистки возвращаемого в криостат ^3He от паров и продуктов

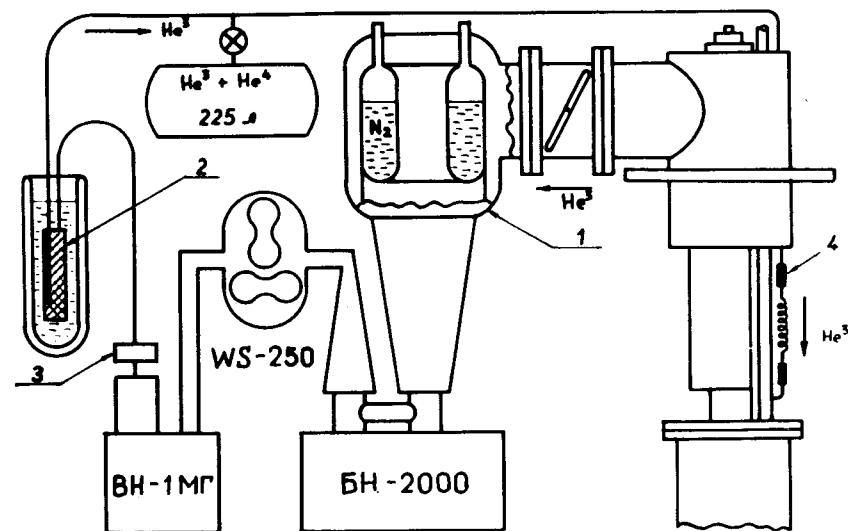


Рис. 2

разложения масла и небольшого количества воздуха из-за возможных наружных течей. Наружная часть этой системы 2 представляет собой три включенные последовательно ловушки, охлаждаемые жидким азотом /на схеме они условно объединены/. Кроме того, непосредственно у выхода механического насоса ВН-1МГ установлен фильтр 3, поглощающий масляный "туман". Первая из охлаждаемых ловушек наполнена медной стружкой, две последующие - активированным углем. Ловушки имеют различное конструктивное исполнение. Отношение площади к толщине слоя поглотителя третьей ловушки примерно в тысячу раз меньше этого отношения второй ловушки. Объемы второй и третьей ловушек, соответственно, 0,8 и 0,2 л. Такая конструкция предотвращает блокирование системы очистки, если первая ловушка по какой-либо причине пропустит часть паров и продуктов разложения масла, и, кроме того, обеспечивает полную очистку ^3He от всех примесей, за исключением водорода.

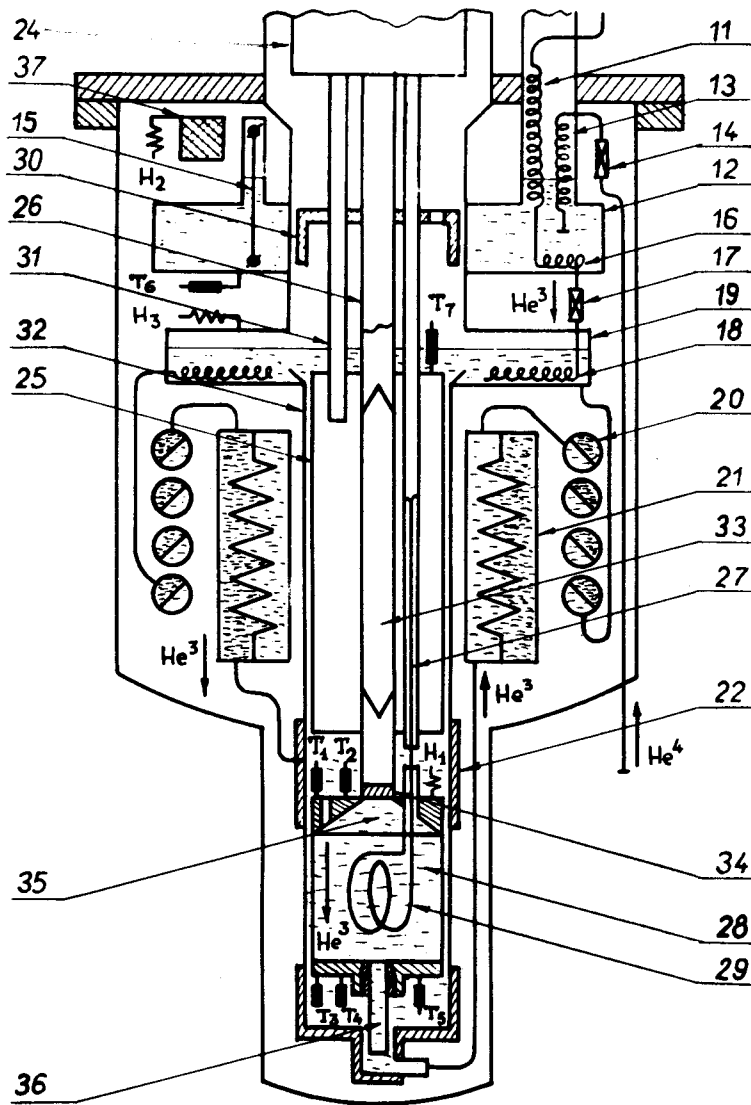


Рис. 3

Для очистки от водорода была добавлена внутренняя система очистки 4, которая представляет собой 5 небольших угольных ловушек, вставленных в разрывы змеевиков охлаждения ^3He /на рис. 2 указаны две ловушки/. В результате установки такой внутренней системы очистки блокирования линии возврата ^3He не наблюдалось даже при непрерывной работе криостата без отогревания в течение 100 ч.

3. Ступень растворения. Ступень растворения является наиболее сложной и ответственной частью всей установки, определяющей основные характеристики мишени. Схема ее показана на рис. 1 и более подробно, с теми же цифровыми обозначениями, - на рис. 3. Представлена также фотография ступени /рис. 4/ со снятой вакуумной рубашкой.

После предварительного охлаждения до 4 K ^3He поступает в змеевик 11, расположенный в тракте откачки паров ^4He из гелиевой ванны, предназначенной для конденсации ^3He /конденсатор 12/. Тракт откачки представляет собой виток спирали, выполненный из нержавеющей трубки $\phi 10\text{ мм}$. Диаметр витка составляет 100 мм , расстояние между концами трубки по вертикали - 30 мм . Внутри трубки расположены два змеевика 11 и 13: первый - для предварительного охлаждения ^3He , второй - для охлаждения жидкого ^4He , который поступает в ванну-конденсатор из криостата по линии питания /капилляр с внутренним диаметром $0,3\text{ мм}$ и игольчатый вентиль 14/. Тракт откачки такой конструкции выполняет две функции: во-первых, уменьшает теплоприток от поступающих в ванну-конденсатор ^3He и ^4He , во-вторых, стабилизирует заполнение этой ванны жидким ^4He . Стабилизация обусловлена наличием отрицательной обратной связи между уровнем жидкого ^4He в тракте откачки и тепловой нагрузкой ванны. Чем выше уровень, тем меньше поверхность змеевиков в паровой фазе и тем короче тепловой мост до фланца ступени. Это препятствует как чрезмерному переполнению, так и осушению ванны, если, конечно, сопротивление игольчатого вентиля установлено в подходящих для данного режима пределах. Практически были подобраны два по-



Рис. 4

ложения иглы вентиля, соответствующих режиму динамической поляризации и замороженному режиму; небольшие изменения режима и случайные колебания вполне укладывались в диапазон стабилизации. Для контроля уровня гелия в ванне был установлен линейный сверхпроводящий датчик уровня 15. Откачка ванны осуществлялась механическим форвакуумным насосом ВН-4 с производительностью 45 л/с. Температура ванны контролировалась угольным сопротивлением T_6 типа Allen-Bradley. Кроме того, можно было непосредственно измерять давление паров ^4He с помощью оптического дифференциального микроманометра. Измеренное давление менялось в пределах от 0,3 до 1,1 мм рт.ст. в зависимости от режима работы рефрижератора. Объем ванны составлял 200 см³. На дне ванны уложен змеевик из медного капилляра 16. Здесь и производилось окончательное охлаждение и конденсация ^3He под давлением, определяемым сопротивлением дросселя 17, установленного в линии ^3He после конденсатора. Дроссель представляет собой нержавеющей капилляр с внутренним диаметром 0,19 мм и длиной 250 мм.

После охлаждения жидкого ^3He в змеевике 18, расположенном на дне ванны испарения 19, ^3He поступает на вход блока теплообменников 20, 21 и затем в камеру растворения 22, где происходит переход атомов ^3He из концентрированной фазы в раствор $^3\text{He}-^4\text{He}$ с поглощением тепла. Под действием перепада осмотического давления, возникающего при удалении ^3He из ванны испарения, атомы ^3He диффундируют вдоль каналов теплообменников, заполненных раствором, и охлаждают встречный поток концентрированного ^3He .

4. Блок теплообменников. Решающим фактором для получения сверхнизких температур в замороженном режиме и большой мощности охлаждения при динамической накачке является конструкция системы теплообменников. В нашем варианте использованы два типа теплообменников /т/о/: трубчатый т/о 20 и сильфонный т/о 21, включенные последовательно.

Трубчатый т/о обеспечивает работу рефрижератора при динамической поляризации, где требуется большая

мощность охлаждения при сравнительно высокой температуре /около 0,3 К/. Кроме того, он необходим для предварительного охлаждения ^3He , чтобы обеспечить функционирование сильфонного т/о в "замороженном" режиме, где необходимо создавать температуру 0,05 К и ниже.

Трубчатый т/о состоит из двух одинаковых секций, включенных параллельно. Каждая секция представляет собой спираль из нержавеющей трубки $\phi 6,1 \times 0,5$ мм длиной 250 см со вставленными внутрь семью капиллярами $\phi 1,7 \times 0,15$ мм. Общая площадь теплообменника составляет 1540 см^2 ; измеренное сопротивление ламинарному потоку по каналу раствора - $2,9 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$, по каналу ^3He - $1,5 \times 10^7 \text{ см}^{-3}$.

Как показывают расчеты, этот теплообменник должен обеспечивать работу рефрижератора в режиме динамической поляризации, т.е. в области 0,3 К, с поглощением тепла 12 мВт , при скорости циркуляции $3,5 \times 10^{-3} \text{ моль/с}$. Было выяснено, что последовательное включение двух секций этого теплообменника приводило при большой скорости циркуляции к чрезмерному сопротивлению диффузии ^3He в растворе и в результате этого - к обеднению раствора в ванне испарения и снижению эффективности растворения. Поэтому при таком включении секций трубчатого т/о расчетная мощность охлаждения при 0,3 К не была достигнута. Причины "срыва" диффузии, связанные с появлением аномального сопротивления т/о при больших скоростях потока, детально не изучались. Доказано только, что уменьшение сопротивления при параллельном включении секций привело к устранению этого эффекта.

Сильфонный т/о имеет большую поверхность теплообмена, равную $1,25 \times 10^4 \text{ см}^2$. В области высоких температур сильфонный т/о не эффективен, но для получения сверхнизких температур, ниже 0,1 К, он играет основную роль. Конструктивно сильфонный т/о выполнен в виде дискового сильфона из 480 нержавеющей колец с внешним и внутренним диаметром 70 и 40 мм, соответственно, толщиной 0,1 мм. Кольца сварены между собой с помощью диффузионной сварки.

Каналы для ^3He и раствора выполнены в виде спиральных канавок на внешней и внутренней поверхностях сильфона; сопротивления каналов ламинарному потоку - $5,2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ и $2,6 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$, соответственно. Зазоры между гофрами сильфона задаются четырьмя рядами прокладок толщиной 0,1 мм.

Эффективность теплообмена в сильфонном т/о определяется не только граничным сопротивлением Капицы, но также теплопроводностью ^3He и раствора в зазорах между дисками. Для исследования качественной стороны работы т/о и получения некоторых численных оценок приведены расчеты идеализированной модели, в которой теплообмен происходит через прямоугольную пластину. При этом граничное теплосоппротивление пластины и теплопроводность ^3He и раствора в зазорах приняты постоянными. Для такой модели имеем простое выражение для потока тепла от более теплого ^3He к холодному раствору в одном зазоре между пластинами:

$$Q = \frac{Lh(T_3 - T_4)(\lambda_3 + \lambda_4)}{\frac{2}{\sqrt{m} \operatorname{sh}(\sqrt{m} \ell)} + \frac{\lambda_3^2 + \lambda_4^2}{\sqrt{m} \lambda_3 \lambda_4 \operatorname{th}(\sqrt{m} \ell)} + \ell} \quad /1/$$

где $m = \frac{\tilde{T}^3 (\lambda_3 + \lambda_4)}{h(\alpha_3 + \alpha_4) \lambda_3 \lambda_4}$, L - длина пластины, h - ширина зазора, T_3 - температура ^3He у теплого края пластины, T_4 - температура раствора у холодного края пластины, λ_3 и λ_4 - теплопроводности ^3He и раствора, \tilde{T} - средняя температура ($T_4 < T < T_3$), ℓ - ширина пластины, $\alpha = R_k T^3 = \text{const}$, где R_k - сопротивление Капицы.

При $T > 0,3 \text{ К}$, т.е. в области сравнительно высоких температур, $\sqrt{m} \gg 1$ и первые два члена в знаменателе выражения /1/ малы по сравнению с ℓ . Выражение /1/ тогда приводится к виду

$$Q = (\lambda_3 + \lambda_4) \frac{Lh}{\ell} (T_3 - T_4) \quad /2/$$

что может быть также получено непосредственно в результате пренебрежения сопротивлением Капицы, которое мало в сравнении с теплосоппротивлением ^3He и раствора в зазорах.

При очень низких температурах, когда $\sqrt{m}l \ll 1$ и $\text{sh}(\sqrt{m}l)$, $\text{th}(\sqrt{m}l) \approx \sqrt{m}l$ все выражение /1/ обращается в обычное выражение для теплопередачи через границу:

$$\dot{Q} = \frac{AT^3 \Delta T}{(a_3 + a_4)}, \quad /3/$$

где A - площадь пластины, равная $L \cdot l$.

Таким образом, сильфонный т/о при очень низких температурах приближается к идеальному трубчатому т/о, что обусловлено сильным возрастанием сопротивления Капицы по сравнению с теплосоппротивлением ^3He и раствора в зазорах.

Численные оценки величины $\dot{Q}/(T_3 - T_4)$, полученные из /1/ при использовании данных из /5-7/, позволяют сделать качественные выводы об эффективности сильфонного т/о при различных температурах. По сравнению с обычным, непрерывным т/о трубчатого типа, имеющим такую же геометрическую поверхность, теплосоппротивление нашего сильфонного т/о при $T = 0,4 \text{ K}$ примерно в 100 раз больше. Однако уже при $T = 0,1 \text{ K}$ отношение теплосоппротивлений уменьшается до 4, а при $T = 0,04 \text{ K}$ - практически до 1.

Ввиду компактности при большой величине поверхности и возможности обеспечивать оптимальное гидродинамическое сопротивление без существенного увеличения объема жидкости сильфонный т/о в области ниже $0,1 \text{ K}$ является наиболее предпочтительным из всех непрерывных т/о.

К сожалению, шунтирование т/о вдоль проточных каналов приводит к ухудшению его качества, если диапазон изменения циркуляции ^3He слишком широк. Требование малого гидродинамического сопротивления для больших циркуляций ^3He приводит к тому, что при сравнительно низкой циркуляции в замороженном режиме обменник частично шунтируется.

Тем не менее применение сильфонного т/о в нашем варианте "замороженной" мишени оправдало себя по двум причинам: во-первых, диапазон рабочих циркуляций оказался не очень большим /тепловые нагрузки рефрижератора в "замороженном" режиме в условиях работы на ускорителе таковы, что понижение скорости циркуляции ниже 10^{-3} моль/с вело к повышению предельной температуры/, во-вторых, достигаемая температура достаточно низка, чтобы за время экспозиции поляризация мишени заметно не разрушалась.

5. Штанга мишени. Одним из центральных узлов установки, во многом определяющим конструкцию нашего варианта, является штанга мишени 23. Схематично устройство штанги показано на *рис. 1*, а более подробное изображение устройства нижней части штанги - на *рис. 3*. Штанга состоит из несущей трубы 24, изолирующей пробки 25, волновода 26, радиочастотного кабеля 27, резонатора 28 с катушкой ЯМР 29.

Теплоkontakt 30 в области ванны-конденсатора служит для уменьшения тепла, поступающего в ванну испарения по волноводу, радиочастотному кабелю, измерительным проводам и трубке откачки 31 изолирующей пробки. Теплоkontakt между медной втулкой, припаянной к указанным узлам, и стенкой ванны-конденсатора осуществляется частично посредством касания и частично через газ в тракте откачки ^3He .

Вакуумнополая тонкостенная изолирующая пробка из нержавеющей стали плотно вставлена в тонкостенную нержавеющую трубку 32, соединяющую ванну испарения с камерой растворения. Зазор между стенками составляет $\sim 0,02 \text{ мм}$, диаметр пробки - 30 мм , длина - 150 мм . Гидродинамическое сопротивление в этом зазоре примерно в 10^3 раз превышает сопротивление блока обменников по каналу раствора. Наверху изолирующей пробки расположен угольный термометр T_7 для измерения температуры ванны испарения ^3He .

Волновод из нержавеющей трубки $\phi 10 \times 0,5 \text{ мм}$ в нижней части заполнен пробкой 33 из пенопласта для защиты от излучения с теплого конца волновода. Волновод имеет

общий с изолирующей пробкой вакуум; герметизация нижнего конца волновода выполнена с помощью кварцевого стекла 34, приклеенного эпоксидной смолой.

Медный резонатор согласуется с волноводом посредством рупора 35, имеющего отверстия для входа диффундирующего ^3He . В дне резонатора имеется трубка 36, вставленная в отверстие выхода камеры растворения. Соединение трубки с дном резонатора резьбовое, со шлицевым уплотнением $\phi 10$ мм, сопротивление которого много больше сопротивления вещества мишени. Так как сопротивление зазора между трубкой и отверстием приблизительно в 100 раз превышает сопротивление шариков пропандиола, заполняющих резонатор, то ^3He принудительно диффундирует через резонатор и эффективно охлаждает вещество мишени. На резонаторе также укреплены угольные термометры T_1 и T_5 для контроля температуры рефрижератора во всем диапазоне и калибровки сигнала ЯМР пропандиола. Нагреватель из константана H_1 служит для измерения холодопроизводительности рефрижератора. Методика и результаты измерения основных характеристик рефрижератора приведены в *Приложении*.

Штанга мишени уплотняется на верхнем фланце тракта откачки ^3He . Там же присоединяется специальное шлюзовое устройство, позволяющее вынимать штангу из рефрижератора, не нарушая герметичности тракта откачки ^3He . Такое устройство штанги позволяет менять вещество мишени в процессе работы установки. Благодаря этому описываемое устройство может использоваться и как исследовательская установка.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕФРИЖЕРАТОРА. ТЕРМОМЕТРИЯ

Измерения характеристик рефрижератора производились с помощью угольных термометров. Для их калибровки мы воспользовались равновесным сигналом ЯМР самого вещества мишени. Так как время спин-решеточ-

ной релаксации быстро растет с понижением температуры, то для сокращения времени установления теплового равновесия в системе ядерных спинов при сверхнизких температурах приходилось значительно снижать напряженность магнитного поля. Сигналы ЯМР от протонов пропандиола наблюдались с помощью аппаратуры для измерения поляризации, которая могла работать только в магнитном поле 26,9 кГс. Поэтому после соответствующей выдержки вещества мишени при заданных условиях напряженность магнитного поля быстро поднималась до 26,9 кГс. Процедура подъема напряженности была выбрана такой, чтобы при этом не происходило заметных изменений поляризации вещества. Этот прием является своеобразным "замораживанием" статической поляризации протонов вещества мишени. Точность такой калибровки достаточно высока и определяется в основном точностью калибровки сигнала ЯМР в области 1,5 К с помощью угольного резистора T_1 , тщательно калиброванного в магнитном поле в отдельной установке.

Единственным недостатком нашей калибровки является тот факт, что различным температурам на калибровочной кривой соответствуют различные магнитные поля. Оставался открытым вопрос, насколько сильно изменяется тепловая нагрузка на рефрижератор /и, следовательно, температура раствора/ при изменении магнитного поля в условиях механических вибраций установки. Для того чтобы ответить на этот вопрос, мы поместили в камеру растворения угольные термометры, показания которых слабо зависят от магнитного поля (Resistor - Speer, 220 Ом/. Оказалось, что повышение температуры рефрижератора из-за увеличения магнитного поля является незначительным. Это объясняется, по-видимому, очень хорошей механической связью ступени растворения с магнитом и, кроме того, тем, что большинство узлов низкотемпературной части /обменники и камера растворения/ изготовлены из нержавеющей стали. Косвенным подтверждением правильности калибровки термометров в магнитном поле является также хорошее совпадение измеренной и расчетной холодопроизводительности рефрижератора.

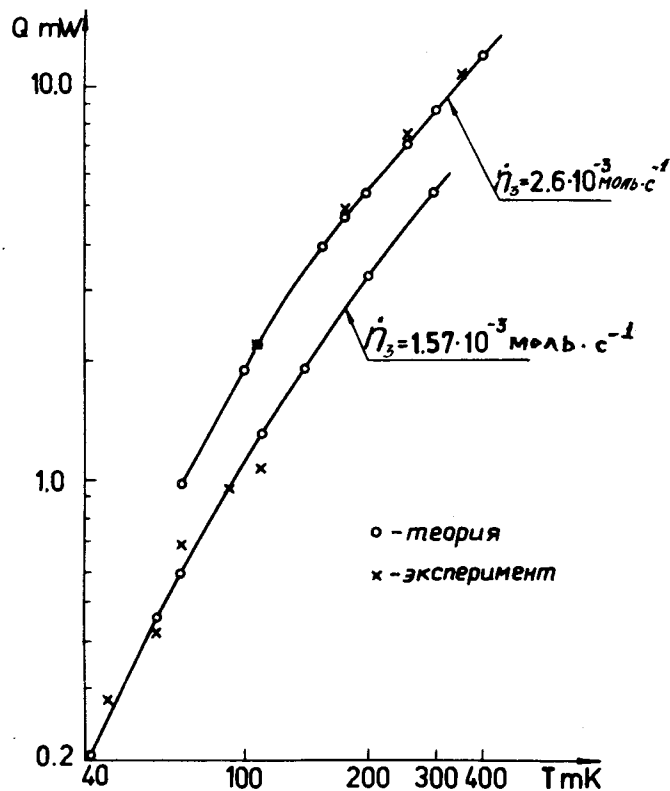


Рис. 5

На резонаторе штанги мишени были размещены следующие термометры: Allen-Bradley /18 Ом/ для калибровки сигнала ЯМР в области $1,5 \text{ К} / T_1$, рис. 3/, два термометра типа Speer, 220 Ом /на входе резонатора - T_2 и на выходе - T_3 / и дублирующие угольные термометры T_4 и T_5 . С помощью этих термометров мы сняли основные характеристики рефрижератора растворения.

Зависимость холодопроизводительности рефрижератора от температуры при двух значениях циркуляции ^3He показана на рис. 5. Кратко работу рефрижератора можно проиллюстрировать следующими характеристиками:

1/ при $\dot{n}_3 = 3,5 \times 10^{-3} \text{ моль/с}$ и тепловой нагрузке 12 мВт температура раствора $T = 0,3 \text{ К}$; 2/ при $\dot{n}_3 = 10^{-3} \text{ моль/с}$ в "замороженном" режиме $T = 0,035 \text{ К}$. Нужно отметить, что этот же рефрижератор в условиях лабораторного корпуса позволял достичь $T = 0,02 \text{ К}$ при $\dot{n}_3 = 7 \times 10^{-4} \text{ моль/с}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.С.Борисов и др. ОИЯИ, Р1-9912, Дубна, 1976.
2. Б.С.Неганов. Вестник АН СССР, 12, 49, 1968.
3. Б.С.Неганов, Н.С.Борисов, М.Ю.Либург. ЖЭТФ, 50, 1445, 1966.
4. Н.С.Борисов и др. ОИЯИ, Р6-7408, Дубна, 1973.
5. R.Radebaugh. NBS, Technical Note, 362, December 29 /1967/.
6. Н.С.Борисов, Б.С.Неганов, Г.Феллер. ОИЯИ, Р8-7008, Дубна, 1973.
7. O.V.Lounasmaa. Experimental Principles and Methods below 1 Kelvin. New York, 1974.
8. W. de Boer, T.O.Niinikoski. Nucl. Instr. and Meth., 114, 495 /1974/.
9. T.J.Schmugge, C.D.Jeffries. Phys.Rev., 138, 1785 /1965/.
10. W. de Boer. Dynamic Orientation of Nuclei at Low Temperatures. CERN, 74-11, Geneva, May 13 /1974/.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 ноября 1976 года.