

Физическая аппаратура

УДК 53.082.6;536.5 + 53.08:621.38 + 532.08;5331/.5.08

Расширение функциональных возможностей терморегулируемых криостатов жидкостно-проточного типа

И. П. Жарков, Ю. И. Жирко, А. Н. Иващенко, В. В. Сафронов, А. И. Солонецкий

Для расширения функциональных возможностей гелиевых жидкостно-проточных криостатов создана система автоматического поддержания давления паров жидкого криоагента. На примере результатов экспериментального использования разработанного устройства для управления температурой в гелиевом криостате с применением жидкого азота в качестве основного криоагента без изменения конструкции гелиевого криостата в температурном диапазоне 77—350 К показано, что применение предложенного способа обеспечивает работу в необходимом температурном диапазоне с точностью не хуже $\pm 0,05$ К при минимальном расходе криоагента.

PACS: 07.20Mc + 47.80Fg + 07.50 Ek

Ключевые слова: криосистема, устройство, давление паров, жидкий азот, стабильность температуры.

Введение

Существующие в мире автономные гелиевые криостаты могут быть жидкостного или проточного типа [1].

Из самого определения проточного криостата следует необходимость создания через теплообменник камеры термостатирования криостата непрерывного потока криоагента. Для этого между транспортным сосудом (или резервуаром автономного криостата) и выпускным трубопроводом криостата создается разность давлений. Для создания необходимой разности давлений используются два способа: понижение давления в выпускном трубопроводе криостата с помощью механического вакуумного насоса или повышение давления в резервуаре автономного криостата. Величина потока криоагента через рабочую камеру криостата зависит от указанной разности давлений.

Существуют также и комбинированные гелиевые криостаты жидкостно-проточного типа, изготавливаемые Институтом физики НАН Украины и

известные под маркой УТРЕКС (от аббревиатуры слов Унифицированная Терморегулируемая Криостатная Система), а также создаваемые научной компанией РТИ (г. Черногловка, Московской обл., РФ). В этих криостатах реализуется метод Свенсона вариации температуры, состоящий в том, что жидкий криоагент под небольшим давлением испаряющегося над поверхностью жидкости газа по трубопроводу поступает в теплообменник, испаряется в нем и направляется в рабочую камеру, после чего выводится из криостата через регулируемый вентиль. Для более точного управления температурой применяется электрический нагреватель, размещенный на наружной поверхности теплообменника. Стабилизация заданной температуры осуществляется путем достижения в рабочей камере баланса "холод—тепло" за счет дозированной подачи криоагента в рабочую камеру и управляемого нагрева самой камеры [2—5].

В связи с тем, что:

а) по ряду причин в ряде стран бывшего СССР, а также во многих других странах возникают проблемы с обеспечением жидким гелием, но практически нет проблем с обеспечением жидким азотом;

б) только Институтом физики НАН Украины за последние 25 лет поставлены в различные научные организации ближнего и дальнего зарубежья более 400 криосистем гелиевого типа, возникла задача исследовать возможность использования гелиевых криостатов с применением жидкого азота в качестве основного криоагента без изменения конструкции криостата. Простое использование

Жарков Иван Павлович, зав. лабораторией.

Жирко Юрий Иванович, зав. сектором.

Иващенко Алексей Николаевич, младший научный сотрудник.

Сафронов Виталий Викторович, научный сотрудник.

Солонецкий Анатолий Игнатьевич, ведущий инженер.

Институт физики НАН Украины.

Украина, 03650, Киев-28, пр. Науки, 46.

Тел.: (38 044) 525-16-30, 525-16-23.

E-mail: zharkov@iop.kiev.ua

Статья поступила в редакцию 3 декабря 2009 г.

гелиевых криостатов в качестве азотных является неэффективным вследствие большой инерционности системы и невозможности стабилизировать с высокой точностью температуру исследуемого образца и т. д.

Теоретический анализ

Комбинированные гелиевые криостаты являются автономными устройствами, содержащими в себе гелиевую емкость и азотную рубашку, а также нагреватель, смонтированный на теплообменнике камеры термостатирования. Управление температурой в области 4,2—350 К осуществляется изменением скорости принудительной (за счет избыточного давления над зеркалом жидкого криоагента) подачи криоагента в камеру термостатирования и нагревом криоагента.

Изменение температуры образца при этих условиях достигается за счет теплообмена с потоком газообразного криоагента, проходящего через камеру термостатирования и обдувающего образец. Стабилизация температуры осуществляется достижением баланса "холод–тепло" за счет управляемого нагрева и дозированной подачи газообразного криоагента. Ввиду различия теплофизических характеристик газов гелия и азота необходимо обеспечить такую скорость потока газа, при которой параметры регулирования температуры камеры термостатирования будут оставаться неизменными. Однако при этом следует учесть, что с увеличением количества отбираемого газа из бака давление паров над зеркалом жидкости будет падать, а для обеспечения стабильной температуры на образце необходимо иметь постоянную скорость его обдува парами и, следовательно, иметь активный управляемый элемент для обеспечения постоянного давления паров азота. Теоретическое решение поставленной задачи лежит на поверхности: необходимо обеспечить постоянное избыточное давление газообразного криоагента в гелиевом баке криостата.

Методика

При ламинарном потоке криоагента в стационарном режиме в камере термостатирования криостата устанавливается динамическое равновесие, при котором количество теплоты, подводимой к камере Q_k , равняется сумме количества теплоты, которая поступает за счет нагрева Q_h и отбирается при охлаждении Q_{fr} :

$$Q_k = Q_h - Q_{fr}. \quad (1)$$

Выполнение уравнения (1) обеспечивается управлением параметрами исполнительных устройств, к которым относятся напряжение на на-

гревателе U_h и скважность импульсов охлаждения, определяемая напряжением управления охлаждением U_{fr} .

Экспериментальная часть

Предлагается устройство, структурная и функциональная схемы которого представлены на рис. 1. Система поддержания давления содержит индуктивный датчик давления, генератор-дискриминатор, усилитель мощности, испаритель, компаратор защиты датчика уровня жидкого криоагента.

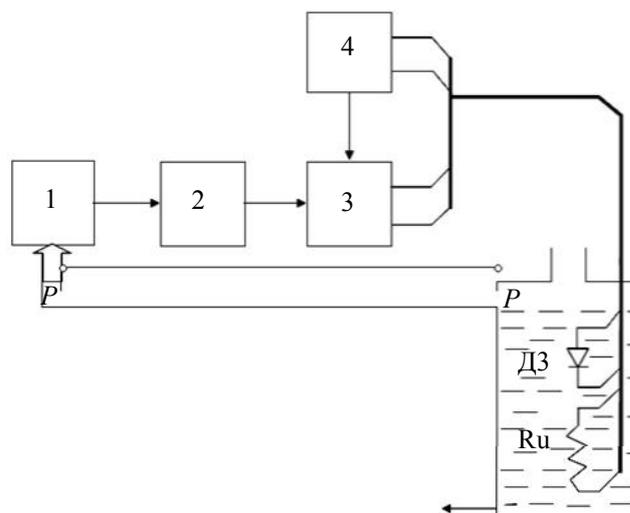


Рис. 1. Функциональная схема устройства для поддержания давления паров азота в баке криостата:

- 1 — датчик давления; 2 — генератор-дискриминатор;
- 3 — усилитель мощности; 4 — компаратор защиты; 5 — бак криостата с жидким криоагентом; ДЗ — датчик защиты;
- Ru — испаритель

1. Индуктивный датчик давления содержит катушку индуктивности с ферритовым стержнем. Изменение давления газообразного криоагента приводит к перемещению ферритового стержня и, соответственно, к изменению индуктивности катушки.

2. Генератор-дискриминатор собран на микросхеме К174УР3. Изменение индуктивности катушки, расположенной в датчике давления, приводит к изменению частоты генератора и, следовательно, выходного напряжения частотного дискриминатора, поступающего на вход усилителя мощности.

3. Нагрузкой усилителя мощности является испаритель (Ru), расположенный на вставке, находящейся в баке криостата с криогенной жидкостью.

4. Компаратор защиты содержит диодный датчик защиты (ДЗ), расположенный на вставке над испарителем. Схема контролирует уровень криогенной жидкости в баке криостата и отключает испаритель при понижении уровня криоагента ниже допустимого.

При изменении давления паров криоагента в баке криостата от P_0 до $0,8 P_0$ (P_0 — номинальное давление, которое поддерживается маностатом криостатной системы), изменение индуктивности датчика давления преобразуется в управляющее напряжение, которое изменяется от $U(P_0) = 0$ до $U(0,8P_0) = 5$ В и подается на вход усилителя мощности, нагрузкой которого является испаритель. Выделяемая на испарителе мощность меняется от $W(P_0) = 0$ до $W(0,8P_0) = 16$ Вт.

Результаты и их обсуждение

Для определения технических характеристик устройства и эффективности решения поставленной задачи были проведены исследования динамики процесса термостатирования при использовании жидкого азота в качестве основного криоагента, результаты которых представлены на рис. 2—5.

На рис. 2 представлена температурная зависимость величины перерегулирования заданной температуры $\Delta T_{\text{пер}}$ от давления паров азота в баке криостата.

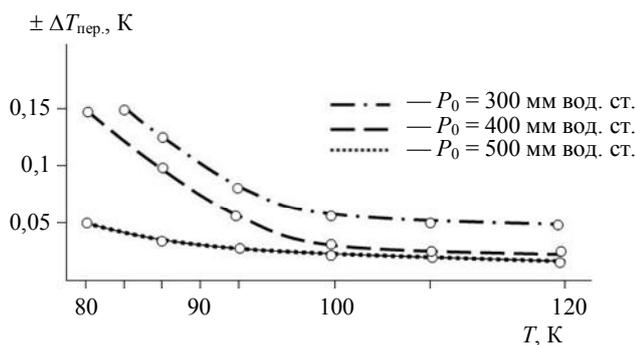


Рис. 2. Температурная зависимость величины перерегулирования от давления

На рис. 3 и 4 приведены, соответственно, температурные зависимости величины стабильности температуры $\Delta T_{\text{ст}}$ и расхода жидкого азота от начального давления P_0 . Из них следует, что максимальные перерегулирование и нестабильность ($\pm 0,05$ К) имеют место при низких температурах и невысоком давлении паров газа. Следует отметить, что указанное значение нестабильности гораздо ниже аналогичного показателя ($\pm 0,1$ К) в криосистемах лучших мировых производителей, таких как Oxford Instruments (Великобритания), Jannis (США), Abbess (США), и соответствует такому же показателю в случае использования жидкого гелия в качестве рабочего криоагента. Симметричность процессов подхода к заданной температуре достигается адекватностью нагрева и охлаждения, а величина $\Delta T_{\text{пер}}$ оптимизируется подбором в регуляторе температуры, являющимся нетъемлемой частью криосистемы, регулировкой

коэффициентов включения по рассогласованию $K_{\Delta T}$ ($\Delta T = T_S - T_R$) и обеспечением скорости изменения температуры K_{dT} ($dT = \Delta T/\Delta t$) согласно пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону регулирования температуры.

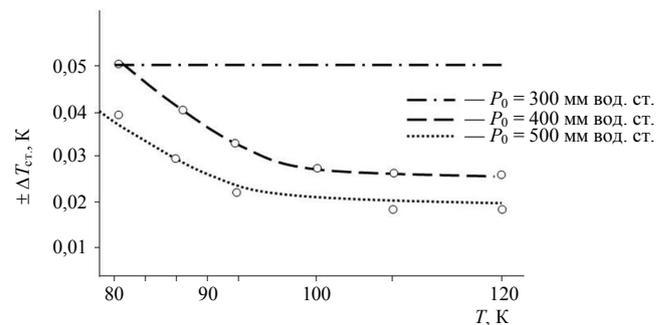


Рис. 3. Температурная зависимость стабильности температуры от давления

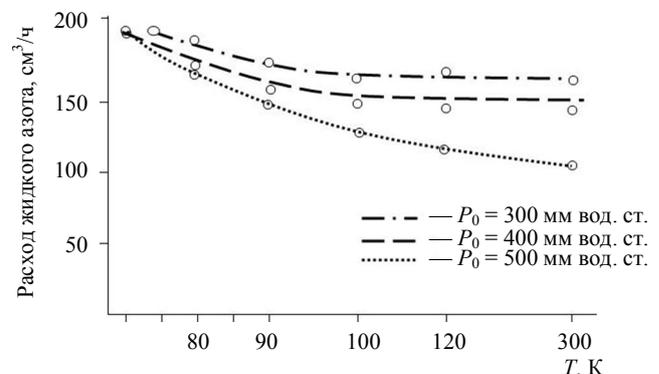


Рис. 4. Температурная зависимость расхода жидкого азота от давления

На рис. 5 приведена временная зависимость выхода криостатной системы на заданную температуру T_S с использованием системы автоматического поддержания давления паров азота в рабочем резервуаре криостата, а также и без нее. Из данных рис. 5 следует, что достижение заданной температуры с применением устройства происходит гораздо эффективнее, чем без него.

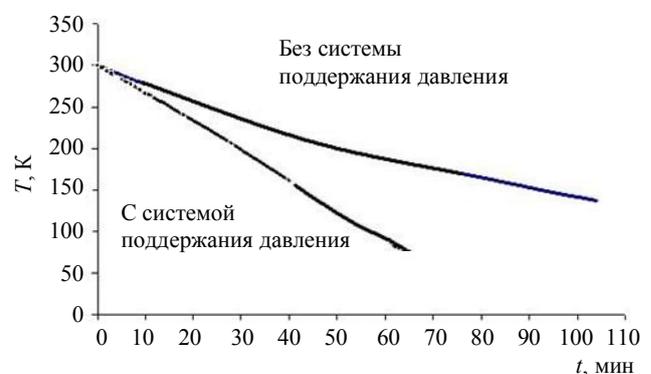


Рис. 5. Процесс понижения температуры в криостате с использованием жидкого азота в качестве основного криоагента с системой поддержания давления и без нее

Из сравнительных характеристик криоагентов, приведенных в таблице, следует, что устройство может использоваться практически с любым его видом (кроме He3 или смесей на его основе).

Сравнительные характеристики различных криоагентов [6]

Криоагент	Теплота испар. жидк./газ, Дж/г	Теплоемкость газа, Дж/(г·К)	$T_{кип}$, К
Гелий	21,9	8	4,2
Азот	199,36	2	77,34
Аргон	160	1	87,29
Криптон	107	0,55	119,78
Ксенон	95,7		165,02
Неон	86,7		27,09

Основные технические характеристики устройства:

- сопротивление испарителя — 100 Ом;
- напряжение на испарителе — 40 В;
- область давлений — 300—500 мм вод. ст.

Заключение

В результате практического использования разработанного и описанного в статье устройства

значительно расширены функциональные возможности существующих гелиевых жидкостно-проточных криостатов (без изменения их конструкции) за счет применения в качестве основного криоагента вместо жидкого гелия других типов жидких криоагентов, а также сохранены все основные точностные характеристики термостабилизации при минимальном расходе криоагента.

Л и т е р а т у р а

1. Беляева А. И., Силаев В. И., Стеценко Ю. Е. Проточные криостаты для лабораторных исследований. — Киев: Наукова думка, 1987.
2. Медведев В. С., Ермаков В. М., Водолазский П. В. и др.// Бюлл. изобретений СССР. 15.07.1974. № 26. С. 126. А. с. 436334 СССР, МКИ G 05d 23/30, G 05d 16/06.
3. Жарков И. П., Ермаков В. М., Сафронов В. В., Чмуль А. Г.// Вестник ХГУ, 1999. № 434. Сер. "Биофиз. вестник". Вып. 3. С. 125.
4. Жарков И. П., Ермаков В. М., Сафронов В. В., Чмуль А. Г.// Бюл. изобр. Украины. 15.11. 2006. № 11; Патент 18778 Украины на полезную модель. МПК G 05D 23/30.
5. Объединенная научная компания "Криомагнитные системы". Оборудование для физических исследований. — Черноголовка: Рекламный проспект.
6. Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. — М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963.

Expansion of functionality of the liquid-flowing helium cryostats

I. P. Zharkov, Yu. I. Zhirko, A. N. Ivaschenko, V. V. Safronov, A. I. Solonetskiy
 Institute of Physics, NAS of Ukraine, 46 Nauka av., Kiev-28, 03650 GSP, Ukraine
 E-mail: zharkov@iop.kiev.ua

With the purpose of expansion of functionality of helium liquid-flowing cryostats a system of self-acting retention of pressure of vapours of a liquid cryoagent is designed. Experimental usage of the designed device for temperature control of a helium cryostat with application of liquid nitrogen as a basic cryoagent without a modification of a construction of a cryostat in a temperature range 77—350 K has been made. It is shown that the application of the offered way ensures operation in a necessary temperature range with an accuracy not worse ± 0.05 K at minimum consumption of the cryoagent.

PACS: 07.20Mc + 47.80Fg + 07.50 Ek

Keywords: cryosystem, device, retention of pressure of vapour, liquid nitrogen, temperature stability.

Bibliography — 6 references.

Received December 3, 2009