

ДРОССЕЛЬНЫЙ РЕФРИЖЕРАТОР ДЛЯ ПЛАЗМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А.Б. Батраков, Ю.Н. Волков, Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: lonin@kipt.kharkov.ua

Описан надежный, экономичный неоновый рефрижератор производительностью 3 кВт на температурном уровне 28 К и производительностью жидкого неона в ожигительном режиме 58,3 дм³/ч. Приводятся области плазменных исследований, где данная разработка наиболее эффективна.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы основными холодильными машинами для охлаждения массивных криогенных объектов с большими тепловыделениями на температурных уровнях ниже 30...40 К являются холодильные газовые машины. В них основным (практически единственным) хладагентом служит газообразный гелий. Хотя для решения многих подобных задач предпочтительным является использование жидкого неона как хладагента для охлаждения непосредственно криогенного объекта. Это определяется его термодинамическими свойствами (особенно большой теплотой испарения). Особенно существенным это будет при криостатировании

сверхпроводников с температурой сверхпроводящего перехода от 30 до 70 К, например, MgB₂.

КОНСТРУКЦИЯ РЕФРИЖЕРАТОРА И ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Неоновая холодильная машина включается в замкнутый цикл, который обеспечивает хранение газообразного неона, получение и хранение жидкого неона, охлаждение объекта и сбор газообразного неона. В эксперименте нами был использован традиционный газгольдерный цикл, схема которого показана на Рис. 1.

Такой цикл практически исключает потери неона и снимает вопрос о стоимости газообразного неона.

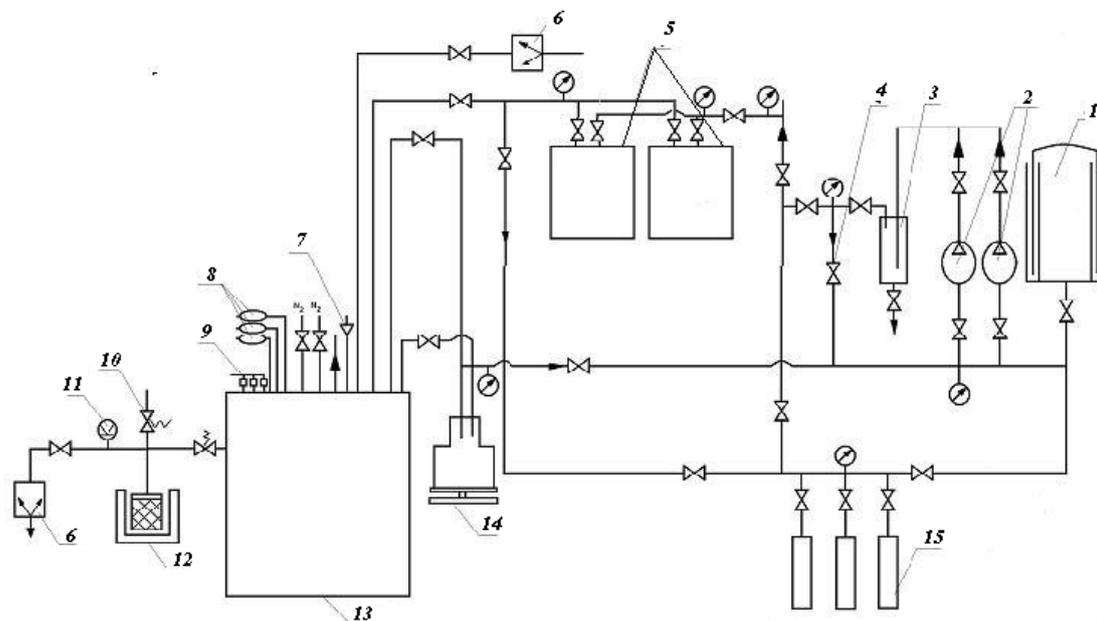


Рис. 1. Схема неоновой цикла:

1 – газгольдер; 2 – компрессоры; 3 – блок грубой очистки газа; 4 – шунт; 5 – низкотемпературный блок тонкой очистки газоблока 1; 6 – механические форвакуумные насосы; 7 – дроссель-вентиль; 8 – датчики температуры; 9 – датчики уровней криогенных жидкостей; 10 – предохранительные клапаны; 11 – манометрический датчик; 12 – адсорбционный насос; 13 – блок ожигения неоноблока 2; 14 – сосуд Дьюара для слива жидкого неона; 15 – баллонная рама

В качестве холодильной машины был выбран дроссельный рефрижератор с предварительным охлаждением жидким азотом. Дроссельная схема холодильной машины была выбрана из-за отсутствия движущихся частей и простоты изготовления. Можно выделить такие положительные моменты в использовании такой схемы:

1. Это снижает вероятность аварий, что подтверждается длительным временем эксплуатации подобных холодильных машин.

2. Позволяет установить в цикле более простую систему автоматизации.

3. Дроссельная конструкция снижает требования к чистоте газообразного неона. Это снижает цену

используемого газа в 6-10 раз. Дроссельные холодильные машины могут использоваться для очистки и разделения газовых смесей (в частности неонгелиевой смеси с примесями азота).

Исходя из опыта конструирования и эксплуатации холодильных дроссельных машин, авторы предложили конструкцию рефрижератора, состоящего из двух основных блоков: тонкой очистки и предварительного охлаждения газообразного неона (блок 1, Рис. 1, поз. 5) и блок ожижения неона (блок 2, Рис. 1, поз. 13). Более подробно блок 2 показан на Рис. 2. Конструкция этих двух блоков была предложена для упрощения и технологического изготовления рефрижератора, а также простоты монтажа и ремонта. Разделение на блоки позволяет разместить охлажденные азотом блоки очистки газа в ванне первого блока, заполненной жидким азотом. Благодаря этому можно совместить тонкую очистку неона и его предварительное охлаждение, что сокращает распад жидкого азота в 1,6 раза. В блоке 1 находятся два газовых теплообменника и ванна с жидким азотом, в которой помещен теплообменник и папероны для тонкой очистки азота.

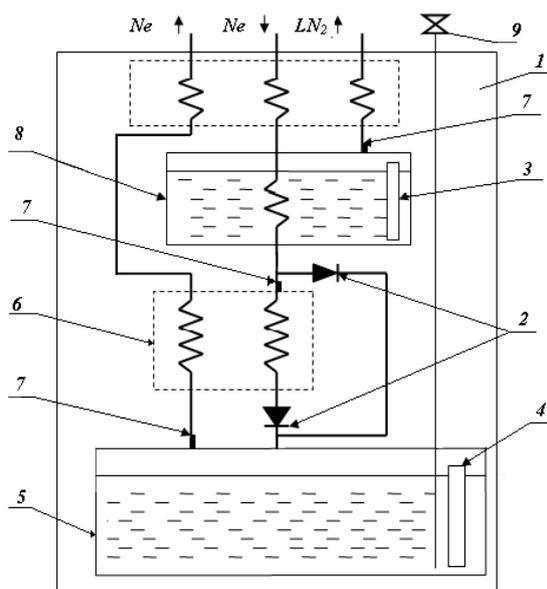


Рис. 2. Блок ожижения неона:

- 1 – корпус; 2 – дроссель-вентиль; 3 – датчик уровня жидкого азота; 4 – датчик уровня жидкого неона; 5 – сборник-сепаратор неона; 6 – датчики температуры; 7 – газовые теплообменники; 8 – ванна жидкого азота; 9 – вентиль слива жидкого неона

Дросселирование прямого потока неона начинается после достижения 64 К непосредственно в сборник жидкого неона без охлаждения основного теплообменника ($m = 53$ кг). Основной теплообменник охлаждается обратным потоком неона. Это сокращает время запуска рефрижератора. В сборнике неона установлен сепаратор, который предотвращает захват капель жидкого неона обратным потоком и снижает влияние прямого потока на накопленный жидкий неон, что повышает реальный коэффициент

В этом блоке газообразный неон охлаждается до 80 К. При использовании рефрижератора при непрерывной работе в течение нескольких суток используются поочередно 2 блока очистки (второй блок в это время регенерируется). Блок выводился для регенерации при большой разнице давлений на входе и выходе $\sim 20 \dots 30$ атм. Также для сокращения расхода жидкого азота в блоке предварительного охлаждения установлен дополнительный теплообменник, позволяющий использовать обратный поток неона, возвращающийся из объекта охлаждения с переменной температурой. Существенное сокращение расхода происходит при охлаждении объектов $m \geq 10^2$ кг. При охлаждении объектов $m \geq 10^3$ кг аналогичный теплообмен устанавливается в низкотемпературном блоке для оптимизации охлаждения в диапазоне 30...70 К (Рис. 2).

В блоке 2 размещены два газовых теплообменника, ванна с жидким азотом, температура которого понижена до 64 К, сборник жидкого неона с сепаратором парожидкостной смеси, дроссель-вентиль и переливные вентили. В ключевых точках блоков и цикла установлены датчики температуры, давления и уровня криогенных жидкостей.

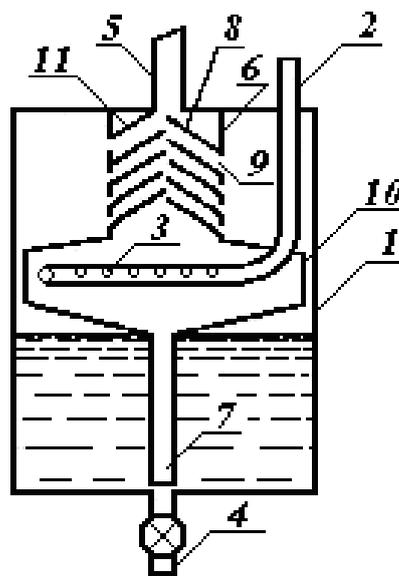


Рис. 2,а. Сборник-сепаратор:

- 1 – корпус; 2 – трубка ввода парожидкостной смеси; 3 – отверстие; 4 – трубка слива жидкого неона; 5 – трубка отвода газообразного неона; 6 – колонна; 7 – трубка отвода жидкого неона; 8 – отбойники; 9 – отверстие; 10 – расширительная часть колонны; 11 – трубка выравнивания давления

ожижения холодильной машины. Предусмотрены слив жидкого неона во внешнюю емкость и соединение линией с объектом охлаждения.

Рефрижератор работает с компрессором с рабочим давлением 20 МПа и производительностью 240 м³/ч. Минимальные параметры компрессора для эффективной работы данного рефрижератора 12...13 МПа и 100...120 м³/ч. В ожижительном режиме производительность составляет 58,3 дм³/ч при расходе жидкого азота 2,3...30 дм³ на 1 дм³ жидкого

неона. В рефрижераторном режиме расход азота сокращается более чем на 50% (в зависимости от соотношения прямого и обратного потоков). Время достижения режима ожижения 45 мин.

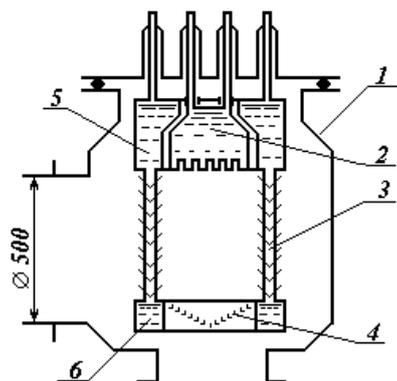


Рис. 3. Неоновый высоковакуумный конденсационный насос ДУ-500.

1 – корпус насоса; 2 – откачивающий элемент; 3 – боковой шевронный экран; 4 – нижний шевронный экран; 5 – верхняя азотная емкость; 6 – нижняя азотная емкость

В рефрижераторном режиме достигается холодопроизводительность 3 кВт на температурном уровне 28 К (при равенстве прямого и обратного потоков).

ПРИМЕНЕНИЕ НЕОНОВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

Рефрижератор разрабатывался для снабжения жидким неоном криогенной системы откачки стендов наземной отработки электрореактивных двигателей (ЭРД), где рабочим телом является ксенон, то

есть необходима откачка тяжелых высокоэнергетичных частиц, что предполагает снятие больших тепловых нагрузок с откачивающих поверхностей. Для откачки стендов были сконструированы насосы под стандартные вакуумные затворы ДУ-500 и ДУ-900, общий вид которых показан на Рис. 3 и 4. Технические данные насосов приведены в таблице.

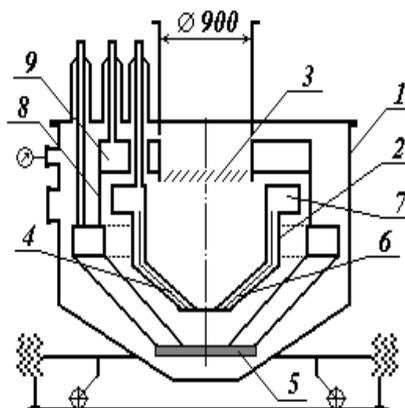


Рис. 4. Неоновый высоковакуумный насос ДУ-900: 1 – корпус насоса; 2 – откачивающий элемент; 3 – жалюзийный экран; 4 – нижний азотный экран; 5 – адсорбент; 6 – перегородка; 7 – неоновая емкость; 8 – азотный экран; 9 – азотная емкость

Технические данные насосов ДУ-500 и ДУ-900

Наименование насоса	Расход ксенона через источник, мг/с	Основное рабочее давление, Па	Площадь откач. пов-ти, м ²	Макс. масса сконденсированного ксенона, кг	Расход жидкого неона в насосе, дм ³ /ч	Одноразовый залив неона	Общая масса, кг	Масса откач. элемента, кг
ДУ-900 (НКВН-50000)	6,2	9·10 ⁻³	1,4	22...23	0,4	40	700	130
ДУ-500 (НКВН-15000)	2,0	9·10 ⁻³	0,2	~3,8	0,08	35	110	28

Из приведенных данных видно, что для обеспечения системы откачки требуется мощный рефрижератор. Испытания более мощных современных ЭРД с расходами 25...100 мг/с ксенона потребовали увеличить быстроту действия насосов. Резкое повышение может обеспечить только размещение откачивающих элементов внутри откачиваемой барокамеры. При увеличении площади откачивающей поверхности и внутреннем размещении криопанелей увеличиваются требования к рефрижераторам и при одновременной работе трех криопанелей используется практически вся мощность рефрижератора.

Эффективность неоновых рефрижераторов была также показана [1 - 4] при работе с имитаторами космического пространства – газодинамическими уста-

новками. В установке V=6 дм³ с неоновыми криопанелями площадью 4 м² в импульсном режиме был достигнут расход до 4 г/с при давлении 5·10⁻² Па.

Использование жидкого неона будет эффективно при охлаждении ВТСП, например, MgB₂ (Ts ~ 40...42 К). Либо при предварительном охлаждении сверхпроводящих объектов массой m ≥ 10³ кг, так как известно, что более 95% отводимой теплоты приходится на диапазон 300...28 К. Аналогичная задача была решена при охлаждении сверхпроводящей магнитной системы плазменной установки – торсатрона "Кристалл-2" (сверхпроводник Ni-Ti).

Неоновые оживители использовались в различных установках с небольшой потребностью жидкого неона от 0,1 до 5 дм³ в час.

ВЫВОДЫ

Разработан и изготовлен надежный, экономичный неоновый рефрижератор производительностью 3 кВт на температурном уровне 28 К и производительностью жидкого неона в ожижительном режиме 58,3 дм³/ч.

Данная разработка может быть эффективно использована при исследованиях свойств электрореактивных двигателей, при использовании ВТСП в магнитных системах плазменных ловушек и в других плазменных исследованиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б.П. Батраков, Ю.Н. Волков, В.А. Кравченко, В.М. Леонов, В.Г. Фараонов, С.Л. Чепель. Криогенная неоновая газодинамическая установка // *ВАНТ. Серия «Общая и ядерная физика»*. 1984, в. 1(26), с. 42-46.
2. Ю.Н. Волков, В.А.Кравченко. Откачка ксенона конденсационными неоновыми насосами наливного типа // *Вакуумная техника и технология*. 2006, т. 16, № 3, с. 183-186.
3. Ю.Н. Волков, В.А. Кравченко, Ю.Ф. Лонин. Конденсация при больших тепловых и массовых нагрузках на поверхности, охлаждаемые жидким неоном // *6 Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми холодильної техніки і технології"*. Одеса, 2009, с.130-131.
4. В.М. Мурашко, А.А. Нестеренко, В.И. Савенко и др. Система неоновой криооткачки для отработки и эксплуатации ускорителей плазмы мощностью до 10 кВт // *12 Всесоюзная конференция по плазменным ускорителям и ионным инжекторам (тезисы докладов)*. Харьков, 1989. с. 274-275.

Статья поступила в редакцию 08.09.2015

THROTTLE REFRIGERATED PLASMA'S STUDIES

A.B. Batracov, Yu.N. Volkov, Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev

The paper described a reliable, economical neon refrigeration capacity of 3 kW temperature of 28 K and liquid neon performance in liquefying mode 58.3 dm³/h. Given the field of plasma research, where this development is most effective.

ДРОСЕЛЬНИЙ РЕФРИЖЕРАТОР ДЛЯ ПЛАЗМОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

О.Б. Батраков, Ю.М. Волков, Ю.Ф. Лонін, А.Г. Пономарьов

Описаний надійний, економічний неоновий рефрижератор продуктивністю 3 кВт на температурному рівні 28 К і продуктивністю рідкого неону у зріджуваному режимі 58,3 дм³/год. Наводяться області плазмових досліджень, де дана розробка найбільш ефективна.