

Московский Государственный университет

Им. М.В.Ломоносова

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА**

М.Ю.Куприянов

**ОХЛАДИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ
ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ДЛЯ
СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ЦИФРОВЫХ И
АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ**

Москва 2000

Составители

Доктор физ.-мат. наук, профессор М.Ю.Куприянов

Под редакцией

Доктора физ.-мат. наук В.П.Кошельца

Рецензент:

Профессор физического факультета МГУ

О.В.Снигирев

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Интеграция», проект 2.1-461

Оглавление

1. Оценка уровня диссипации энергии для различных сверхпроводниковых устройств с целью определения необходимых параметров криогенного оборудования.	5
1.1. Динамические потери.	5
1.2. Статические потери.	6
1.3. Транспорт тепла по цепям ввода – вывода информации.	7
2. Анализ имеющихся криогенных систем.	7
2.1. Обратимые циклы охлаждения.	8
2.2. Необратимые циклы охлаждения (изоэнтальпическое расширение Джоуля-Томпсона)	11
3. Установки замкнутого цикла Гиффорда- МакМахона.	12
4. Коммерческие установки замкнутого цикла Гиффорда- МакМахона.	16
4.1. Продукция фирмы JANIS	16
4.2. Устройства ОАО СИБКРИОТЕНИКА	21
4.3. Продукция компании CRYOMECH	23
4.4. Продукция компании Leibold Cryogenics.	25
4.5. Продукция компании RICOR.	28
5. Установки замкнутого цикла на цикле Стирлинга.	29
5.1. Продукция компании Cryotechnologies SA.	31
5.2.Продукция компании STIRLING CRYOGENIC REFREGIRATION	32
5.3.Продукция Государственного унитарного предприятия "НПО "ОРИОН"	33
5.4. Продукция компании ОАО "СИБКРИОТЕХНИКА"	35
6. Установки замкнутого цикла на цикле Джоуля-Томпсона.	36
6.1. Продукция компании Matra Marconi Space.	39

6.2. Продукция компании CREARE.	40
6.3. Продукция компании ОАО СИБКРИОТЕХНИКА	41
7. Вихревая трубка (Pulse Tube Cryocooler).	42
7.1. Продукция компании Leybold Cryogenics.	48
7.2. Продукция компании JECC TORISHA Co.,Ltd.	49
7.3. Продукция компании RICON	50
7.4. Продукция компании KELVINIC.	52
8. Выработка рекомендаций по выбору криогенных систем для сверхпроводниковых аналоговых и цифровых устройств.	54
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	60

1. Оценка уровня диссипации энергии для различных сверхпроводниковых устройств с целью определения необходимых параметров криогенного оборудования.

В устройствах быстрой одноквантовой логики имеется три источника выделения тепла:

- рассеяние энергии в процессе переключения джозефсоновского вентилля из сверхпроводящего в нормальное состояние (динамические потери);
- рассеяние энергии на сопротивлениях, стоящих в цепях задания тока смещения на джозефсоновский контакт (статические потери);
- транспорт тепла к сверхпроводниковым микросхемам по системе, обеспечивающей ввод и вывод сигнала.

1.1. Динамические потери.

Рассеяние энергии в процессе переключения одного джозефсоновского контакта составляет величину порядка $I\Phi_0$, где $I \approx I_C$ - постоянный во времени ток смещения, заданный внешними источниками, а Φ_0 - квант магнитного потока. Величина критического тока переходов определяется из условия выполнения в процессе вычислений требуемой метрологической точности и при рабочей температуре 4.2 К должна превышать 100 μ А.

С другой стороны, величина критического тока ограничена требованием $I_C L \approx \Phi_0$, где L - типичная индуктивность квантующих сверхпроводящих контуров. Это индуктивность определяется конкретными технологическими параметрами. Так при использовании Nb электродов толщиной порядка 200 нм, индуктивность квадрата Nb пленки, расположенной над сверхпроводящим экраном, составляет порядка 0.3 рН.

Типичный квантовый контур образован не менее 10 квадратами, что дает $L \approx 3$ пН и $I_C \approx 700$ мкА.

Таким образом, в практических устройствах целесообразно иметь джозефсоновские переходы с $I_C \approx 200$ мкА в не зависимости от особенностей технологии, типа джозефсоновского перехода или его геометрических размеров. Необходимо отметить, что по оценкам данная величина критического тока позволяет обеспечить частоту появления ошибочных битов на уровне 10^{-50} , что вполне удовлетворяет имеющимся стандартам вычислений.

Возвращаясь к оценке динамических потерь, необходимо учесть, что в элементарной ячейке БОК логики, содержащей 10 – 15 переходов, за один такт переключается от трех до пяти переходов. В результате мы приходим к оценке в 10^{-18} Дж/бит или 10^{-6} мВт/МГц. Таким образом, в устройстве, содержащем порядка 5 тысяч переходов и работающем на частоте 100 ГГц, динамические потери составят $(5000/5) \times 10^6 \times 10^{-6}$ мВт/МГц ≈ 1 мВт.

1.2. Статические потери.

Статические потери не зависят от частоты обработки сигнала и определяются рассеянием энергии в цепях задания тока смещения на джозефсоновские переходы. В реализованных до настоящего времени устройствах эти потери существенно превосходили динамические. Однако, это обстоятельство не является принципиальным. Их уровень столь мал (≤ 10 мВт для устройства из 5000 джозефсоновских переходов), что вопрос об их подавлении не стоял в практической плоскости. Эту цифру можно уменьшить до значений порядка динамических потерь (путем введения сверхпроводящих индуктивных разветвителей тока вместо используемых

сейчас резистивных делителей) или исключить вовсе используя большее количество переходов для реализации той же логической функции.

1.3. Транспорт тепла по цепям ввода – вывода информации.

В современных устройствах быстрой одноквантовой логики ввод – вывод сигнала осуществляется в основном обычными электрическими кабелями. Осуществляемый ими подвод тепла на уровень температуры жидкого гелия (4.2 К) составляет порядка 100 мВт/канал. В устройствах с числом каналов не более 20 это приводит к оценке сверху на уровне 2 мВт, т.е. не превышает мощность, рассеиваемую непосредственно в самом чипе. По всей видимости, такая организация системы обмена информацией является наиболее оптимальной из имеющихся. Использование кабелей из высокотемпературных сверхпроводников для коммутации от азотной до гелиевой температур еще более снизит поступающую по коммутационным цепям тепловую нагрузку на рабочий модуль.

2. Анализ имеющихся криогенных систем.

Криогенная система (заливной криостат или ожижительная установка замкнутого цикла (криокуллер)) являются необходимой компонентой любой сверхпроводниковой электронной системы. Именно эта часть устройства в значительной мере определяет его массо-габаритные параметры, потребляемую мощность, существенно влияет на стоимость изделия. На Рис. 1. приведен график, дающий представление о соотношении таких важных параметров как рабочая температура, входная мощность, масса и полезная мощность устройства. Из графика нетрудно видеть, что при гелиевой температуре криокуллер с полезной мощностью 1 Вт потребляет примерно 5

кВт и имеет массу в районе 120 –130 кг. Уменьшение полезной мощности в десять раз требует порядка 0,5 кВт на входе, при этом вес изделия составляет 40-50 кг.

В настоящее время рынок охладителей до 4К сформирован устройствами, работающими на основе двухступенчатого цикла Гиффорда-Мак Махона, трехступенчатых устройств с охладителем на эффекте Джоуля – Томпсона в третьей ступени, двухступенчатых вихревых трубок. Ниже будут приведены данные о современном уровне разработок и коммерческих продуктах по каждому из этих направлений.

2.1. Обратимые циклы охлаждения.

Наиболее эффективным обратимым циклом охлаждения является цикл Карно, состоящий из изоэнтропийных циклов сжатия и расширения и изотермического обмена теплом на холодном и горячем тепловых выходах. Однако в этом случае для обеспечения требуемой разности температур между горячим и холодным концами необходимо было бы создать весьма большое и технологически трудно достижимое рабочее давление. Это практически невыполнимо при использовании жидкостей в качестве рабочего тела, так что цикл Карно может быть реализован лишь в магнитных рефрижераторах.

В реальных охладительных установках замкнутого цикла цикл Карно модифицируют и используют цикл Стирлинга или цикл Эриксона. Вместо изоэнтропийного процесса используются либо изохорический (Стирлинг), либо изобарический (Эриксон) процессы (см. Рис.2). Результирующий цикл теоретически имеет ту же эффективность, что и цикл Карно. Однако, как при изохорическом, так и при изобарическом процессах имеет место обмен энергией с окружением. Поглощающееся на этапе расширения тепло в

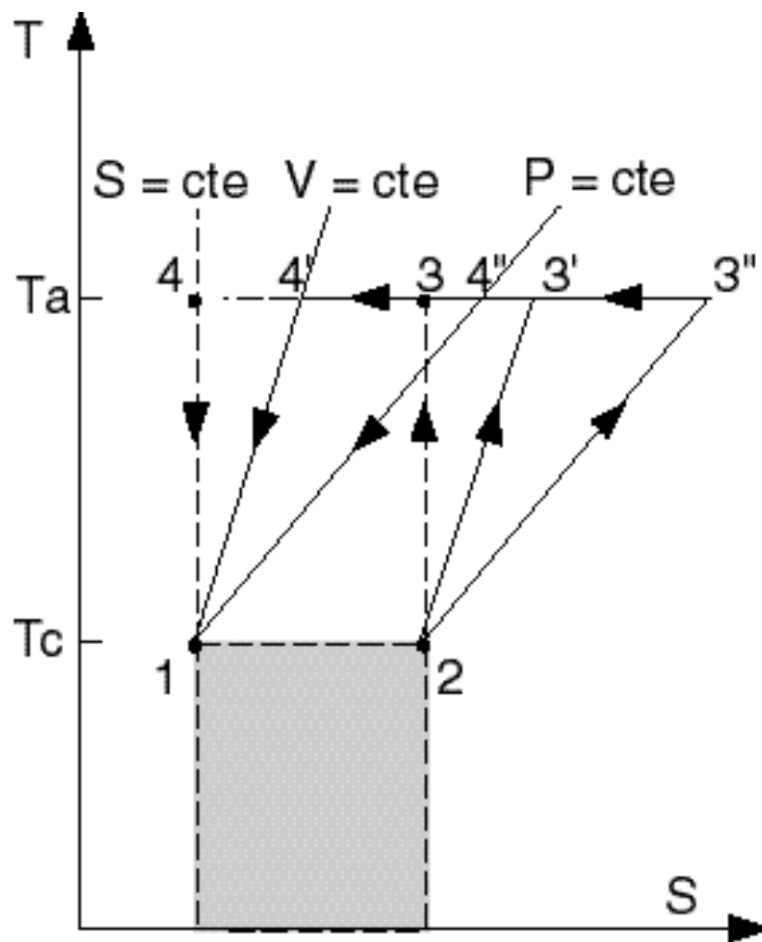
идеальном случае полностью выделяется в процессе сжатия. Поэтому составной частью таких охладительных машин является регенератор, т.е. устройство аккумулирующее и отдающее тепло в течении каждого цикла. От эффективности работы регенератора зависит КПД устройства, которое реально составляет порядка 20% от эффективности цикла Карно. Исторически устройства, использующие цикл Эриксона, носят название охладители Гиффорда-Мак Махона (GIFFORD-McMAHON) в соответствии с именами инженеров, предложивших техническое решение по реализации этого цикла в конкретных коммерческих криокуллерах.

Регенератор делается из пористого материала с большой теплоемкостью. Для предотвращения паразитных тепловых эффектов, возникающих из-за большого градиента температуры (от комнатной до рабочей), регенератор набирается либо из дисков (бронза и нержавеющая сталь при рабочих температурах до 80 К) либо делается из свинцовой дроби диаметром до 200 мкм при работе до 10 К.

Циклы охлаждения, базирующиеся на регенеративном теплообмене (типа Гиффорда-Мак Махона (GIFFORD-McMAHON) или Стирлига (Sterling)) ограничены по хладопроизводительности вследствие быстрого падения теплоемкости регенерирующего материала с уменьшением температуры. Так традиционные устройства такого типа, использующие свинцовую дробь в регенераторе, ограничены температурой 12 К при нулевой тепловой нагрузке и реально работают лишь выше 20К. Тем не менее имеется ряд редкоземельных материалов типа Nd, Er₃Ni, ErCo, которые сохраняют заметную теплоемкость при 4 К [1,2]. На базе этих материалов различными группами [3,4] в Японии [5-7], США [8,9], Германии [10,11] разработаны двухступенчатые криокулеры, использующие принцип Гиффорда-Мак Махона. Минимально достижимая температура в

ненагруженном состоянии составляет примерно 3К, так что при 4.2К удастся отводить тепловую мощность на уровне 0.1 – 1 Вт.

В устройствах, работающих по циклам Стирлинга и Эриксона, не удастся избежать использования движущихся составных частей в холодном пальце, обеспечивающих нужную циркуляцию охлаждающей жидкости. Это является недостатком охладителей на их основе.



1-2-3-4: Carnot (Isothermal - isentropic)
 1-2-3'-4': Stirling (Isothermal - isochoric)
 1-2-3''-4'': Ericsson (Isothermal - isobaric)

Рис.2. Обратимые циклы охлаждения, используемые в современных криокуллерах.

2.2. Необратимые циклы охлаждения (изоэнтальпическое расширение Джоуля-Томпсона)

Необратимое изоэнтальпическое расширение Джоуля-Томпсона является простым статическим процессом, при котором отсутствуют какие-либо движущиеся детали в холодном пальце. Такое расширение может быть организовано за счет простого перепада давления на калиброванном отверстии, капилляре или регулируемом игольчатом клапане. Для получения эффекта охлаждения в результате расширения рабочий газ должен быть предварительно охлажден до температуры ниже точки инверсии (см. Таблицу 1). Видно, что при использовании гелия необходимы предварительные стадии его охлаждения до температуры ниже 50 К. Практически размеры теплообменника выбираются таким образом, чтобы после расширения образовывалась смесь из жидкости и пара. Охлаждение при этом происходит на этапе фазового перехода пар – жидкость за счет поглощения скрытой теплоты парообразования. Работа на равновесной фазовой кривой пар-жидкость позволяет с высокой точностью стабилизировать температуру холодной части.

Недостатками процесса являются его необратимость, не позволяющая достичь оптимальной эффективности процесса. Есть и технические трудности, связанные с засорением капилляров или отверстий содержащимися примесями.

Таблица 1. Температура инверсии и оптимальные давления для рабочих газов.

Рабочая жидкость	Температура инверсии	Оптимальное давление (МПа)
Азот	621	20-60
Водород	205	10-30
Гелий	51	1.2-2.5

3. Установки замкнутого цикла Гиффорда-МакМахона.

Данные ожижительные установки работают с использованием цикла Эриксона. Низкое (0.4 – 0.7 МПа) и высокое (1.5 – 2.5 Мпа) давления в цикле обеспечиваются специальным компрессором. Рабочим газом является гелий. Этот газ моноатомный ($\gamma = C_p/C_v = 1.67$). По этой причине он весьма сильно нагревается при адиабатическом сжатии, что опасно для работы компрессора и сокращает ресурс его работы. Поэтому на этапе сжатия в компрессоре впрыскивается масло, которое служит тепловым адсорбером при сжатии. На выходе из компрессора это масло удаляется в трех последовательных устройствах: центрифуга, коагулятор с линией возвращения масла в исходную точку, физадсорбция в фильтре из активированного угля. Адсорбент необходимо заменять через каждые 10 – 30 000 часов работы. Компрессор соединен с холодным пальцем посредством линий высокого (НР) и низкого давлений (ВР). В холодном пальце имеется поршень с регенератором, который приводится в движение либо механически, либо пневматическим образом. Движение поршня должно быть жестко синхронизировано с включением и выключением линий высокого и низкого давлений с целью обеспечения цикла Эриксона (см.Рис.3). Как правило эти устройства работают с частотой несколько герц.

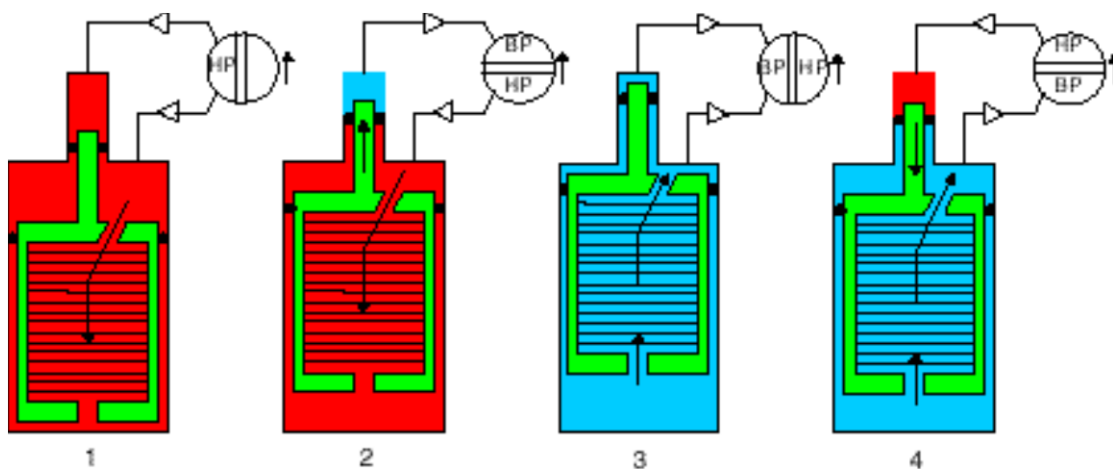


Рис.3. Принцип работы охладительной установки замкнутого цикла Гиффорда-МакМахона.

Охладительные установки данного типа давно коммерциализированы и выпускаются многими фирмами. До недавнего времени (1995 г.) их минимальная рабочая температура в двух ступенчатой конфигурации не опускалась ниже 20 К при полезной мощности 20 Вт и потребляемой мощности 5 – 6 кВт.

Последние разработки в этой области позволили понизить температуру охлаждения до 4 К. К ним относятся

- использования нового компрессора скролингового типа
- модификация вещества регенератора в первой стадии охлаждения путем добавления к традиционным многослойкам из нержавеющей стали и бронзы свинцовой дроби диаметром 100 – 200 мкм, что позволило иметь 15 Вт полезной мощности при 20 К уже на первой стадии охлаждения
- модификация вещества регенератора второй стадии охлаждения посредством замены свинцовой дроби на дробь из редкоземельных металлов, которые имеют фазовый переход в магнитоупорядоченное состояние в области гелиевых температур, сопровождающийся большой аномалией в температурной зависимости теплоемкости.

Основной проблемой этих рефрижераторов, как и любых устройств, использующих циклический процесс, является изменение рабочей температуры в пределах цикла. Охлаждение имеет место только в части цикла, соответствующей расширению. Если тепловая нагрузка постоянна во времени, то температура увеличивается в течении остальных стадий цикла пропорционально отношению количества рассеянного тепла к теплоемкости материала держателя. Типичные вариации для перечисленных в итоговой Таблице устройств составляют 200-400mK в пределах цикла. Эти вариации можно уменьшить используя массивный теплоотвод. Однако это не столь

просто из-за малой теплоемкости материалов при низкой температуре. Кроме того, характерная частота цикла (0.5-1 Гц) устройств на 4К меньше чем в более высокотемпературных аналогах (2-3 Гц для 20К), что требует реализации существенно более протяженных времен тепловой релаксации в демпфирующем материале.

Долговременная стабильность устройств составляет порядка 10000 часов. Ограничивающими ее причинами являются деградация регенерирующего материала теплообменника, вымерзание загрязняющих веществ и т.д. Реально время наработки на отказ колеблется от нескольких дней до нескольких месяцев. Поэтому все производители рекомендуют производить капитальный ремонт изделия в заводских условиях через каждые 10000 часов его работы. В чем состоит такая профилактика остается не вполне ясным для пользователя. Скорее всего она связана с заменой материала регенератора. Так в [12] экспериментально наблюдалось медленное уменьшение теплоемкости материала регенератора во времени. Быстрое нагревание ("defrost" cycle) до температуры 7К восстанавливало параметры материала. Причины этого эффекта, а также ряда других нестабильностей еще до конца не поняты.

Кратковременная стабильность может быть доведена до 2mK посредством использования радиатора, состоящего из 20-30 см³ нержавеющей стали. Это, в частности предусмотрено в устройстве SRDK408 с полезной нагрузкой 400-500 мВт. В отсутствие радиатора этот параметр нестабильности составляет 250mK. Вследствие малой теплоемкости нержавеющей стали, эффективность такого радиатора оказывается тем больше, чем больше площадь ее контакта с холодным пальцем. Более эффективный радиатор получается из многослойной структуры, состоящей из меди и нержавеющей стали. Экспериментальные результаты дают 5 10⁻⁶ mK. [Хотя эти данные выглядят весьма обнадеживающими, они плохо

согласуются с простыми оценками. Объемная теплоемкость нержавеющей стали при 4К больше, чем в чистом материале, но все равно мала. Так использование в качестве радиатора $30 \text{ см}^3 \text{ Er}_3\text{Ni}$, чья объемная теплоемкость существенно превышает теплоемкость нержавеющей стали, дает для теплоемкости радиатора только 3 J/K или 133 mK/сек при нагрузке в 400 мВт.] В целом, пассивная стабилизация кратковременных вариаций температуры эффективна до уровня 20-30 mK, что, по всей видимости, достаточно для устойчивой работы большинства цифровых RSFQ устройств.

К недостаткам этих устройств следует также отнести наличие магнитных материалов в регенераторе. Во-первых, это может сказаться на режимах работы охлаждаемых цифровых устройств и потребует введения дополнительных магнитных экранов. Во-вторых, присущая данным устройствам вибрация может привести к долговременной деградации полезных свойств регенератора и его более частой замены.

Технические комментарии.

- Потребляемая мощность, как правило, указывается для компрессора, работающего в постоянном режиме с специальной нагрузкой на каждой из ступеней охлаждения. На этапах включения и захолаживания требуется большая мощность. Как правило, компрессоры имеют водяное охлаждение, хотя имеются и варианты с воздушным охлаждением.
- Как правило, компрессор не имеет запаса мощности и каких-либо увеличения эффективности за счет компрессора невозможны.

Двухступенчатые охладители замкнутого цикла, использующие цикл Гиффрда-Мак Махона являются более простыми и надежными по сравнению с трехступенчатыми устройствами, использующим комбинацию циклов Гиффрда-Мак Махона и Джоуля-Томпсона. К недостаткам относится

кратковременная температурная нестабильность, для устранения которой необходимо применять пассивная или активные методы ее стабилизации.

4. Коммерческие установки замкнутого цикла Гиффорда-МакМахона.

4.1. Продукция фирмы JANIS

Модель RDK-205D

Данная модель обеспечивает 0.5 ватт полезной мощности при 4.2 К на второй ступени охлаждения и в отсутствие полезной тепловой нагрузки понижает температуру до 3.5 К. Комплектуется компрессором с водяным охлаждением и 10-ти метровыми газовыми подводами. Включается простым нажатием кнопки. Цикл охлаждения – модифицированный цикл Гиффорда-МакМахона, первая ступень – 3 Вт при 50К, вторая (в вертикальной позиции) – 0.5 Вт при 4.2 К. Вес устройства – 15 кг. Размер – 180x294x512 мм. Комплектуется компрессором СКW-21.

Модель RDK-408D

Данная модель обеспечивает 1.0 ватт полезной мощности при 4.2 К на второй ступени охлаждения и в отсутствие полезной тепловой нагрузки понижает температуру до 3 К. Комплектуется компрессором с водяным или воздушным охлаждением и 6-ти метровыми газовыми подводами. Включается простым нажатием кнопки. Цикл охлаждения – модифицированный цикл Гиффорда-МакМахона, первая ступень – 31 Вт при 40К, вторая (в вертикальной позиции) – 1 Вт при 4.2 К. Вес устройства – 18

кг. Размер – 180x294x557 мм. Комплектуется компрессором CSA-71A, CSW-71C, CSW-71C, CSW-71D.

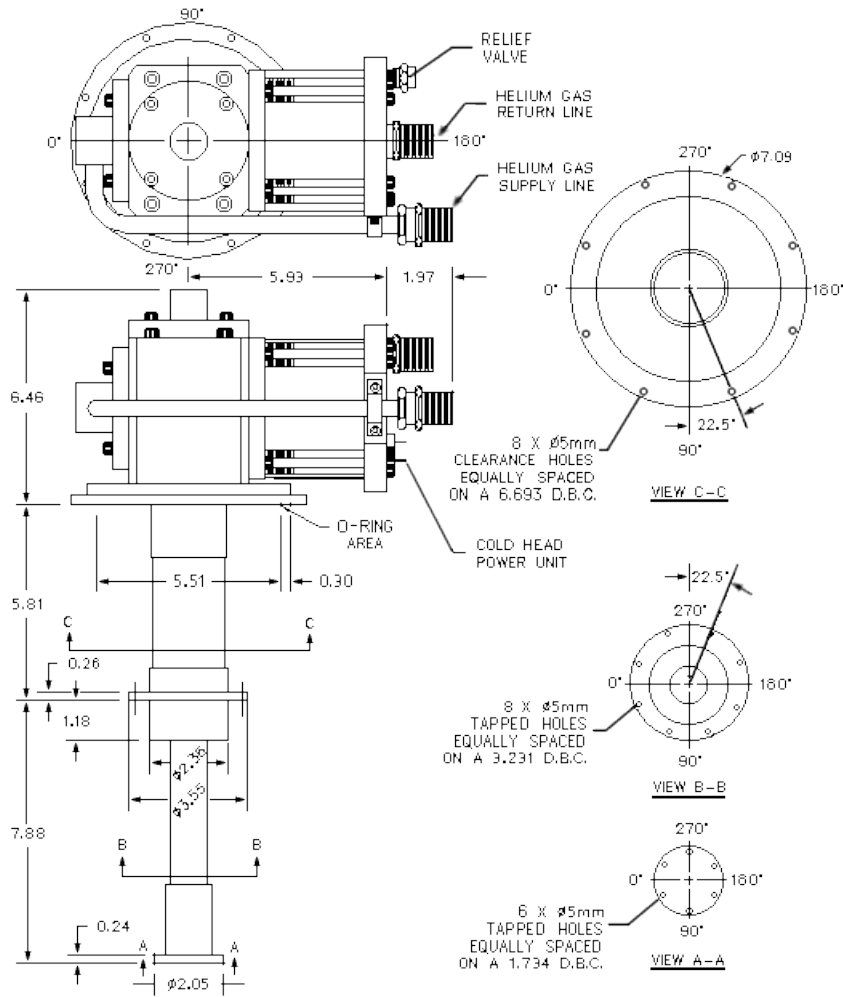


Рис.4.Чертеж модели RDK-205D.

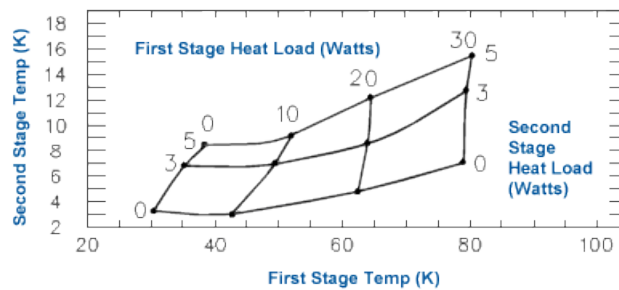


Рис.5.Нагрузочная карта модели RDK-205D.

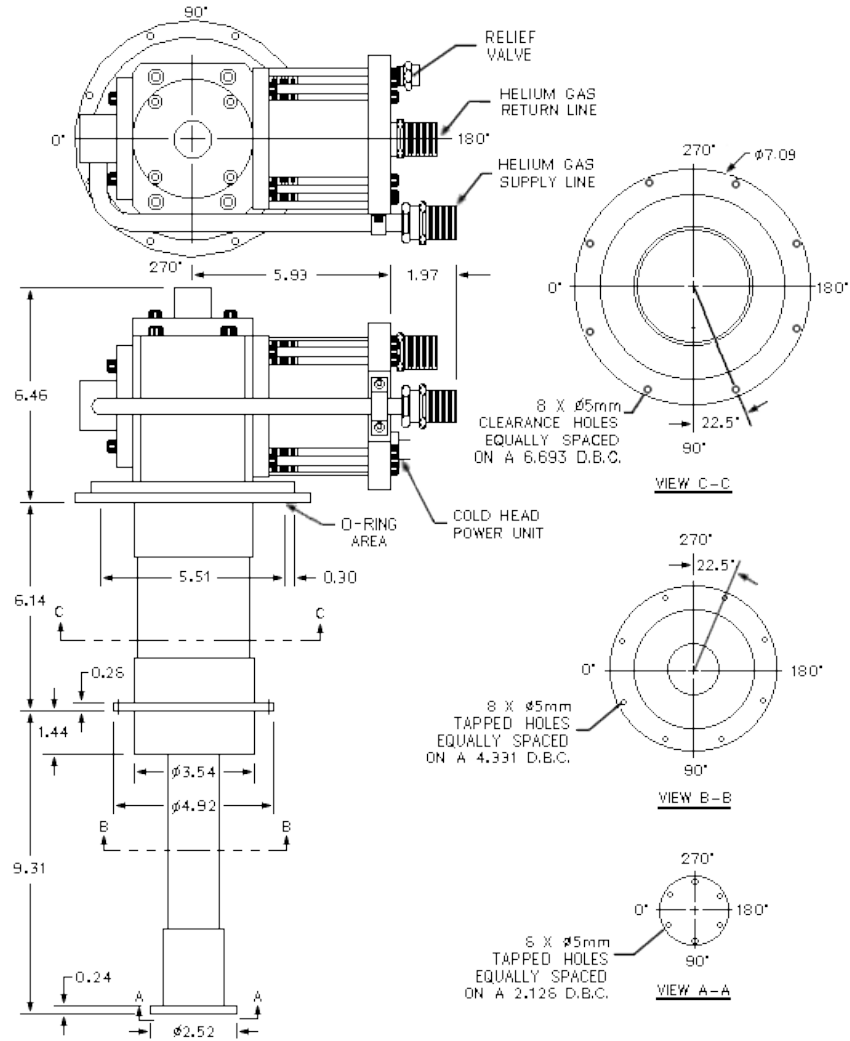


Рис.6.Чертеж модели RDK-408D.

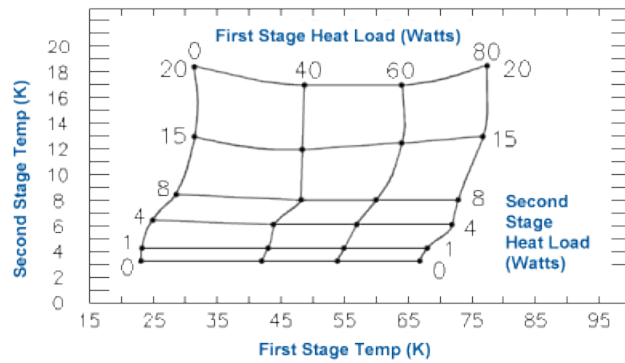


Рис.7.Нагрузочная карта модели RDK-408D.

Модель K-415D

Данная модель обеспечивает 1.5 ватт полезной мощности при 4.2 К на второй ступени охлаждения и в отсутствие полезной тепловой нагрузки понижает температуру до 3 К. Комплектуется компрессором с водяным или воздушным охлаждением и 20-ти метровыми газовыми подводами. Включается простым нажатием кнопки. Цикл охлаждения – модифицированный цикл Гиффорда-МакМахона, первая ступень – 35 Вт при 50К, вторая (в вертикальной позиции) – 1.5 Вт при 4.2 К. Вес устройства – 17,6 кг. Размер – 180x294x557 мм. Комплектуется компрессором CSA-71A, CSW-71C, CSW-71D.

Компрессоры фирмы JANIS.

Наименование	CSA-71A (UL/CE)	CSW-71C (UL/CE)	CSW-71D (UL/CE)
Охлаждение	воздушное	водяное	водяное
Мин. Расход		7 литров/мин	7 литров/мин
Входной коннектор		3/8 NPT Male	3/8 NPT Male
Интервал темп.		4 - 28°C	4 - 28°C
Электр. питание	AC 200V, 3 Phase	AC 200V, 3 Phase	AC 380 - 415V, 3 Phase / 50 Hz
Электр	6.5 kW	6.5 kW	6.5 k
Мощность	(max. 7.2 kW)	(max. 7.2 kW)	(max. 7.2 kW)
Вес	150 kg	115 kg	125 kg
Размеры (мм)	550Dx 50Lx885H	450Dx500Lx684H	450Dx500L x 684H
Рабочая температура - 5 - 35°C, в интервале 28 - 35°C производительность падает на 5%.			
Время работы на отказ – 20 000 часов.			

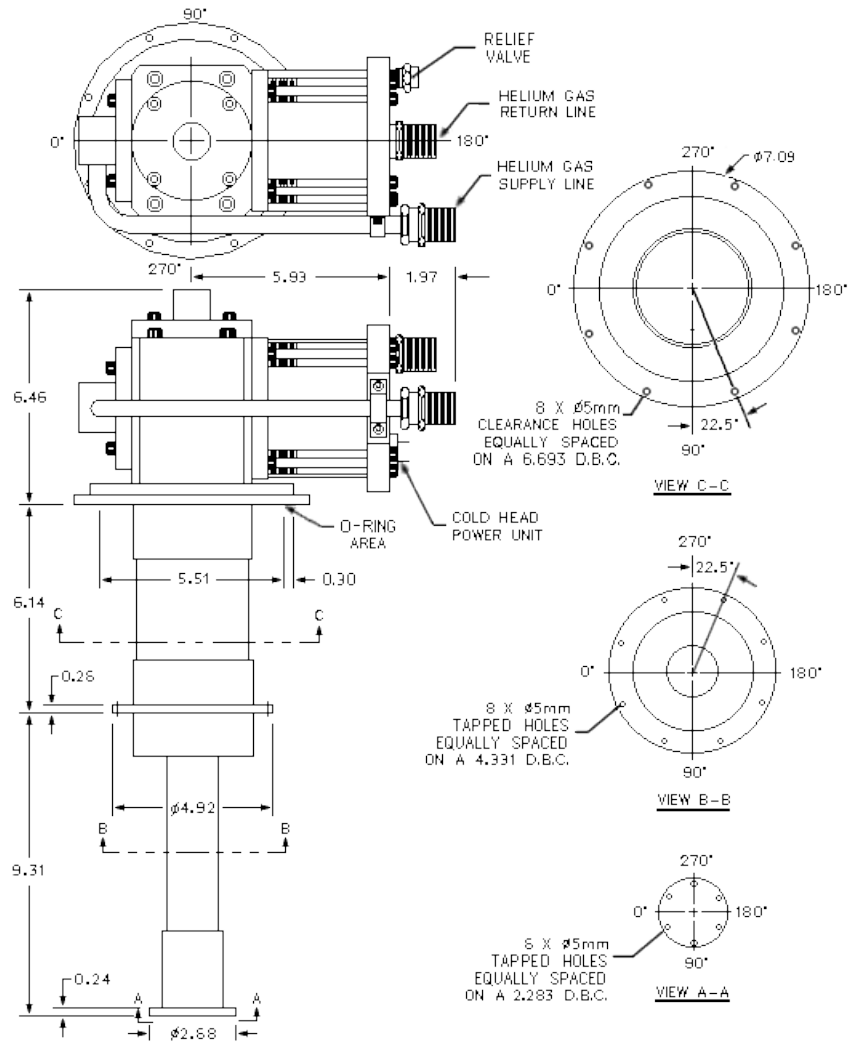


Рис.8. Чертеж модели RDK-415D.

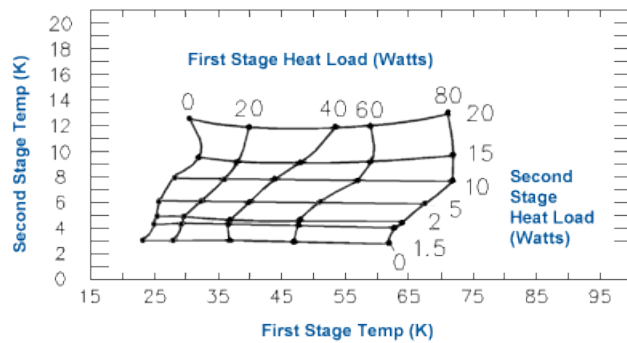


Рис.9. Нагрузочная карта модели RDK-415D.

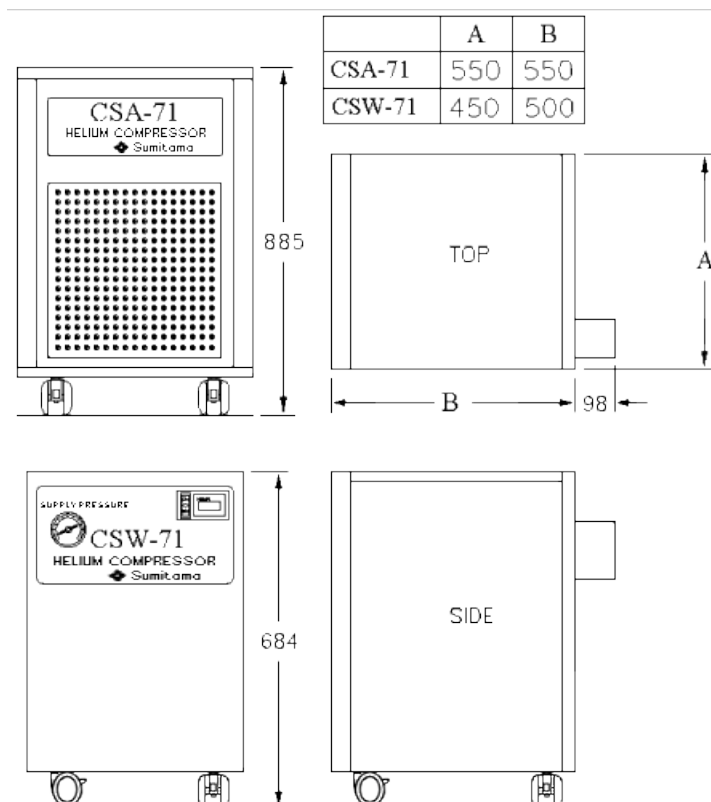


Рис.10.Схематический вид компрессора фирмы JANIS.

4.2. Устройства ОАО СИБКРИОТЕНИКА

Охладительная установка замкнутого цикла.

МСМР-40А-10/80	МСМР-120Н-100/80	МСМР-110Н-3,2/20	МСМР-120А-5/20	МСМР-180А-3,2/20
1ст./2ст.	1ст./2ст.	1ст./2ст.	с 2-мя охладителями	
Температура криостатир., К				
80	80	77/15,5	80/20	100/20
Холодопроизводительность, Вт				
10	100	7/2	50/4	5x2/2x2
Энергопотребление, кВт				
1	3,5	3,5	3,5	4,5

Масса, кг

40 120 115 130 180



Рис.11 Внешний вид продукции ОАО СИБТЕНИКА. Охлаждающая установка замкнутого цикла.

Гелиевые рефрижераторы и осушители малой производительности

Предназначены для криостатирования различных объектов от 1,5 Вт при 4,5 К или для получения жидкого гелия в количестве до 0,35 л/ч.

Возможно обеспечение температуры криостатирования от 4,5 до 150 К

Тип микроожижителя	на базе *ГКМ	на базе *ГММ
Производит. по жидк. продукту, л/ч	до 0,3	до 0,35
Потребл. мощность, кВт	1,7 - 4,0	до 8,0
Время вых. на раб. производ., ч	до 1,5	до 1,0
Масса блоков, кг		
- криогенератор	85 – 200	
- компрессор	74 - 286	
- управление.	15 – 25	42



Рис.12 Внешний вид продукции ОАО СИБТЕНИКА. Гелиевый микроожижитель.

4.3. Продукция компании CRYOMECH

Компания выпускает двухступенчатые охладители на цикле Гиффорда-МакМахона, работающие в области температур 7.5 – 350 К, которые имеют 5 – 100 Вт полезной мощности при 77 К, 2 – 35 Вт при 20 К и охлаждаются до

10 К (в отсутствие нагрузки) за 50 минут. Время работы на отказ – 10 000 часов.

Модель GB15

Вес охлаждающей головки	2.7 kg.
Компрессор	Model CP510
Вес.....	48 kg.
Размер(л x w x h)	41 x 46 x 53 cm.
Потребляемая мощность	1.0kW @ 115 VAC, 1 phase, 60 Hz
.....	200 VAC, 1 phase, 50 Hz
Охлаждение.....	воздушное

Модель GB220

Вес охлаждающей головки	3.8 kg.
Компрессор	Model CP415
Вес.....	57 kg.
Размер(л x w x h)	64 x 43 x 51 cm.
Потребляемая мощность	2.0kW @ 208/230 VAC, 1 phase, 60 Hz
.....	200 VAC, 1 phase, 50 Hz
Охлаждение.....	воздушное или водяное
0.5 gal/мин	

Модель GB220

Вес охлаждающей головки	17.2 kg.
Компрессор	Model CP640
Вес.....	188 kg.(возд.охл) 147 kg.(вод.охл)

Размер(l x w x h)	91 x 64 x 64 см. (возд.охл) 58 x 51 x 99 см.
Потребляемая мощность	5.5kW @ 208/230 or
.....	460 VAC, 3 phase, 60 Hz
.....	200/220 or 380/400 VAC, 3 phase, 50 Hz
Охлаждение.....	воздушное или водяное
1.5 gal/minute	

4.4. Продукция компании Leibold Cryogenics.

Модель Coolpower 4.2LAB



Рис. 13. Внешний вид модели Coolpower 4.2LAB

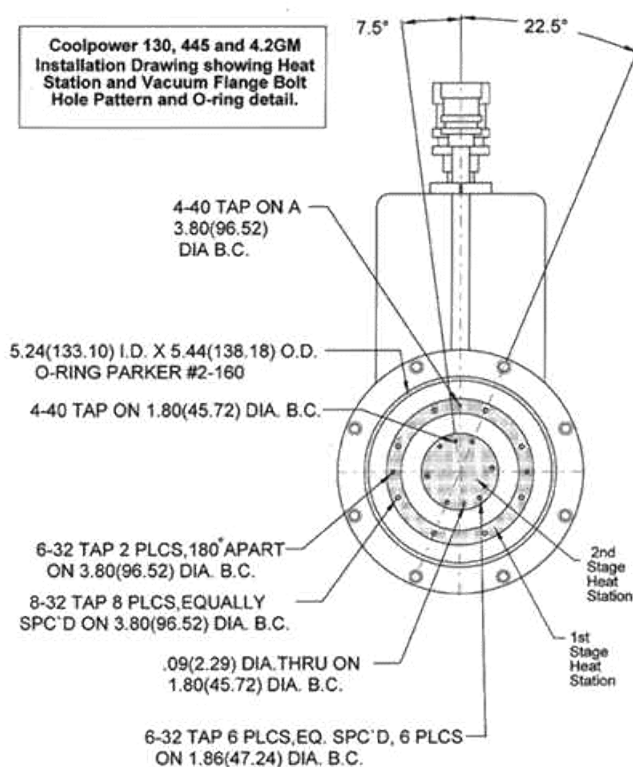


Рис. 14. Чертеж модели Coolpower 4.2LAB

Данное устройство представляет собой двухступенчатый охладитель, работающий на цикле Гиффорда – МакМахона, оптимизированный для работы с объектами не требующими интенсивного отвода тепла. Полезная мощность составляет 0.25 Вт при 4.2 К и 5 Вт при 60 К. Компрессор может быть как с воздушным, так и с водяным охлаждением. Электропитание однофазное 208 В. Цена – менее \$20,000.00.

Компрессор COOLPAK 066S

Компрессор предназначен для работы с гелием, имеет пониженный уровень вибрации, адсорбер (срок жизни 3 года), выполненный из нержавеющей стали, теплообменник гелий\масло – вода, удобное устройство сопряжения,

оборудован краном для перекрытия воды, термометром для измерения температуры гелия.



Рис. 15. Внешний вид компрессора COOLPAK 066S

Номер	010 914 -T	010 915 -T
Тип компрессора:	Scroll	Scroll
Водяное охлаждение		
Требования:	1.5 gpm (5.7 min.)	1.5 gpm (5.7 min.)
Условия работы		
Температура:	5-38 degrees C	5-38 degrees C
Статическое давление:	250 psi (17.2 bar)	250 psi (17.2 bar)
Электро питание:	200-230V/3 phase / 60 Hz or 200V/3 phase / 50 Hz +/- 10%	460V/3 phase / 60 Hz or 460V/3 phase 50 Hz +/- 10%
Мощность:	4.3 kW Nominal	4.3 kW Nominal
Хладагент:	99.995 Helium	99.995 Helium
Вес:	100 kg	100 kg
Габариты:	700 x 505 x 550 mm	700 x 505 x 550 мм

4.5. Продукция компании RICOR.

Компания выпускает широкий спектр одно и двухступенчатых охладителей на базе конфигурации Гиффорда Мас Махона, представленный на Рис. 16



Рис. 16. Продукция компании RICON.

Применение простого пневматического привода позволило разработчикам использовать шаговый мотор с низким уровнем вибрации и позволяет пользователям регулировать частоту движений в охлаждающей головке. Один привод может быть использован при одновременной работе 4-х головок.

5. УСТАНОВКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА НА ЦИКЛЕ СТИРЛИНГА.

Установки данного типа обладают большой полезной мощностью (1 – 4 кВт при 80 К и несколько сотен ватт при 20 К и разрабатываются для высокоточных применений сверхпроводимости при азотных температурах, а также в приборах ночного видения для военных применений. Типичные требования к такого рода устройствам сводятся к нескольким ваттам полезной мощности при 50 К.

Установка включает в себя компрессор, который генерирует волну давления в объеме, включающем в себя дисплейсер и регенератор. Движение дисплейера контролируется либо механически, либо пневматически. Основная задача контроля – как можно более точное воспроизведение условий цикла Стирлинга. Рисунок 17 демонстрирует основные циклы работы охладителя.

Компрессор установки не содержит никаких клапанов. Поршень компрессора движется под влиянием пневматического пружинящего эффекта, возникающего из-за разности среднего давления, воздействующего на нижнюю часть поршня со стороны оболочки, и циклически меняющегося давления в верхней части поршня. Это приводит к движению на оптимальной резонансной частоте, которая составляет несколько десятков

герц. Типичное время жизни устройства составляет несколько тысяч часов и определяется наличием трения между стенками компрессора и дисплейсера.

Основные направления в развитии установок данного типа сводятся к разработке

- интегрированных с дьюаром систем для устройств ночного видения в системах военного назначения (80 К)
- охладителей для ВТСП высокоточных применений (60 К)
- охладителей для устройств на околоземных орбитах (20 К)
- двухступенчатых охладителей, используемых для предохлаждения в криокуллерах на эффекте Джоуля-Томпсона (4К).

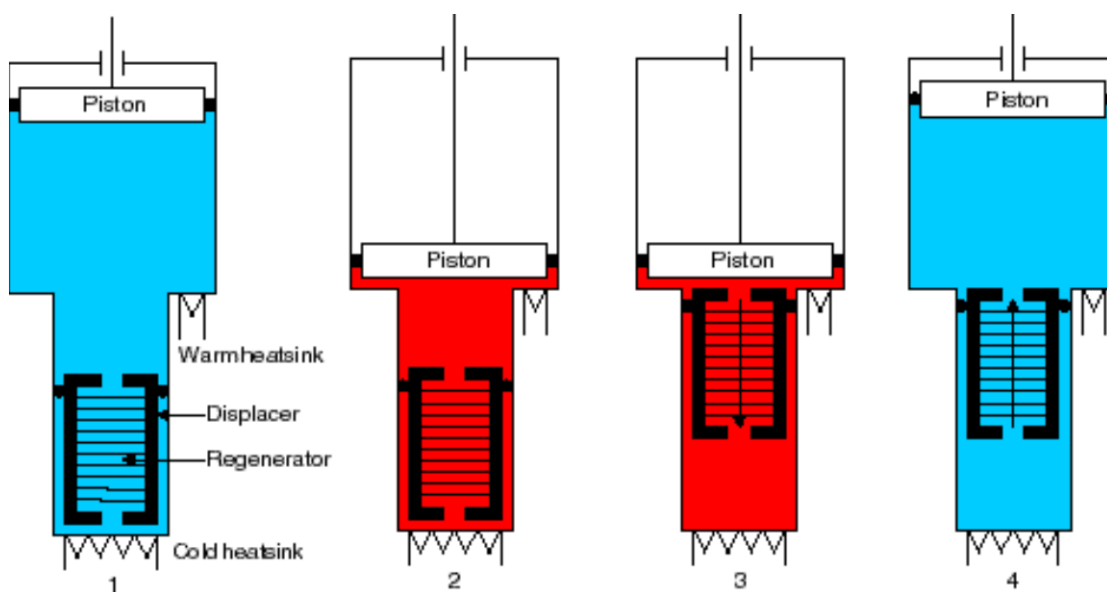
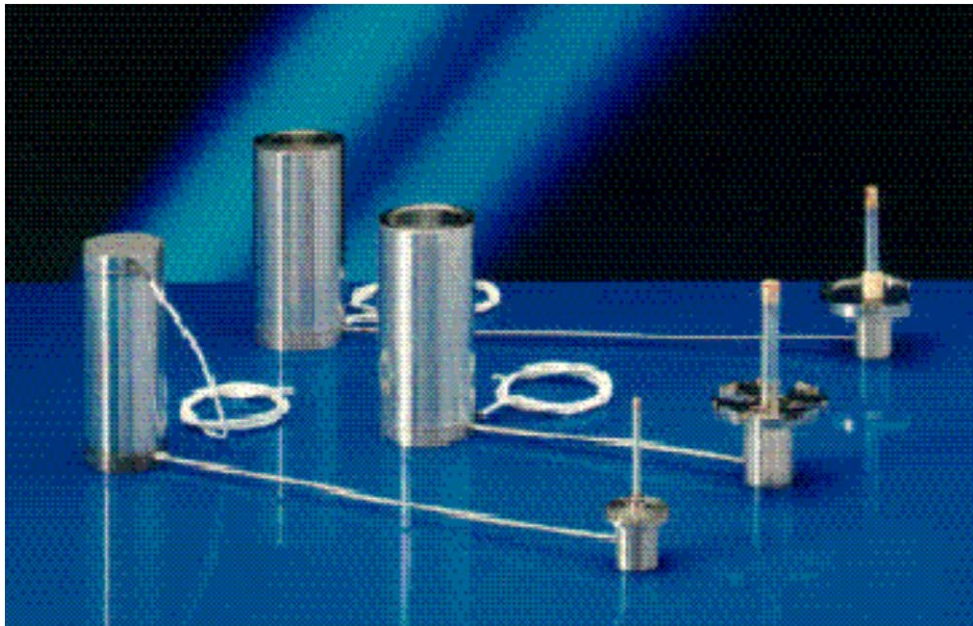


Рис. 17.

Принцип работы охладителя на цикле Стирлинга

5.1. Продукция компании Cryotechnologies SA.



(a)



(б)

Рис. 18.

Охладитель замкнутого цикла на основе цикла Стирлинга в разобранном (а) и собранном (б) видах (продукция Cryotechnologies SA (а) и Air Liquid (б)).

5.2. Продукция компании STIRLINGCRYOGENIC REFREGIRATION

GPC Power Coolers

Модель	Полезная Мощность (Вт) 20К	Полезная расход мощность He(l/min)* (Вт) 80К	Потреб. Мощность (кВт) 65К	Охлажд. (л/час)	Габариты L x W x H (м)	Вес (кг)
GPC01	40	100	1	12	2x1,1x0,6	750
GPC04	160	400	4	45	2 x 0,8 x 2	1400

В устройствах серии GPC холод к нагрузке транспортируется гелием под давлением порядка 20 bar. Они представляют собой двухступенчатый охладитель на температуры 20К и 80К достигаемые на двух теплообменниках. Каждый из них состоит из спиральной трубки и насоса для перекачки холодного газа. Насосы циркулируют газ в двух петлях, на концах которых имеются теплообменники с тепловой нагрузкой.

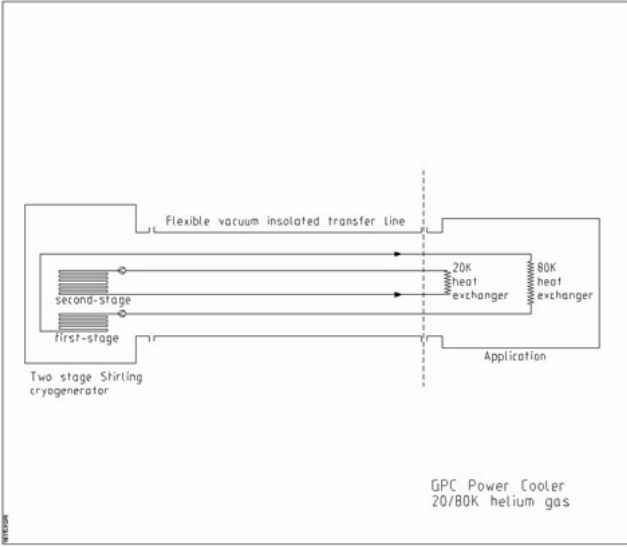


Рис. 19. Принципиальная схема установки фирмы STIRLING CRYOGENIC REFREGIRATION.

5.3. Продукция Государственного унитарного предприятия "НПО "ОРИОН"

МИКРОКРИОГЕННАЯ СИСТЕМА ТИПА J-T

Охлаждающая система открытого цикла

Хладагент	Нитроген
Рабочая температура, К	< 80
Время выхода на режим, мин	< 2,5
Потребление газа	< 1 мл/мин
Диаметр охладителя, мм	6
Время непрерывного действия (от одного наполнения - 0,8 л), часы	> 1,5
Наработка на отказ, часов	> 2000

МИКРОКРИОГЕННАЯ СИСТЕМА ТИПА ИСМО

Тип ГКМ	интегрированный Стирлинг
Рабочий газ	Гелий
Рабочая температура, К	80
Холодопроизводительность (при 77 К), Вт	0,25
Время выхода на режим (при 23°C), мин	4 - 5
Диаметр холодного пальца, мм	6,3
Наработка на отказ, часов	> 1000
Потребляемая мощность, Вт:	
при захолаживании	< 12
в стационарном режиме	< 7
Напряжение питания, В	24
Общий вес, гр	500

МИКРОКРИОГЕННАЯ СИСТЕМА ТИПА ТСО

Тип ГКМ	Сплит-Стирлинг
Рабочий газ	Гелий
Рабочая температура, К	80
Холодопроизводительность (при 77 К), Вт	0,75
Время выхода на режим (при 23°C), мин	< 5
Максимальный внешний диаметр холодного пальца, мм	5
Длина холодного пальца, мм	50; 63
Наработка на отказ, часов	> 1500
Потребляемая мощность, Вт:	
при захолаживании	< 30
в стационарном режиме	< 25
Напряжение питания, В	24
Общий вес, гр	1050



Рис.20. Миниатюрное охлаждаемое интегрированное фотоприемное устройство из HgCdTe, рабочая температура 77 К.

5.4. Продукция компании ОАО "СИБКРИОТЕХНИКА"

Сфера деятельности:

- научно-исследовательская, опытно-конструкторская, производственная деятельность в области криогенного и микрокриогенного оборудования и холодильной техники

- производство стационарных и мобильных установок для получения жидких и газообразных азота и кислорода производительностью 85кг/час, цистерн для хранения и транспортирования жидких азота, кислорода, аргона, вакуумных криогенных насосов, создающих сверхвысокий сверхчистый вакуум без органических загрязнений

- выпуск микрокриогенных систем, позволяющих охлаждать и поддерживать заданную температуру микрообъектов

- экспорт холодильного и криогенного оборудования и товаров народного потребления:



Рис.20. Микрокриогенные системы на базе газовых криогенных машин Стирлинга фирмы НПО "СИБКРИОТЕХНИКА».

6. Установки замкнутого цикла на цикле Джоуля – Томпсона.

Основной рынок установок данного типа – охладители на 80 К для инфракрасных детекторов в системах наведения ракет. Полезная мощность – от нескольких сотен милливатт в постоянном режиме до нескольких ватт в течении нескольких минут. Рабочий газ – воздух, азот или аргон. Газ предварительно сжимается в баллоне до 20-60 МПа и выпускается в атмосферу. Из-за высокого начального давления, организовывать замкнутый цикл оказывается нецелесообразным (см. Рис.21.).

Для достижения гелиевых температур рабочий газ (гелий) необходимо предварительно охладить до 50 К. Это связано с тем, что идеальный газ невозможно охладить в процессе адиабатического расширения. Такое охлаждение (эффект Джоуля-Томпсона) возможно вследствие перехода запасенной в газе внутренней энергии, запасенной в молекулярных связях, в кинетическую в результате расширения. Для каждой жидкости имеется интервал температур и давлений внутри которых процесс расширения сопровождается охлаждением. Для гелия это интервал температур от 10 до 40 К при давлениях от 10 до 30 атмосфер. При более низких температурах и более высоких давлениях охлаждающий эффект на единицу массы выше. Расширение считается адиабатическим (происходящим без выделения тепла), поскольку элементарный объем расширяющейся жидкости проходит через отверстие за весьма короткое время. Результирующая температура определяется конечным давлением и тепловым балансом с нагрузкой. При достаточно низком выходном давлении (менее 2.24 атм для He4) и достаточно высоком дебите адсорбирования тепла от нагрузки рабочая жидкость может еще находиться в жидкой фазе. Сохранение контакта этой

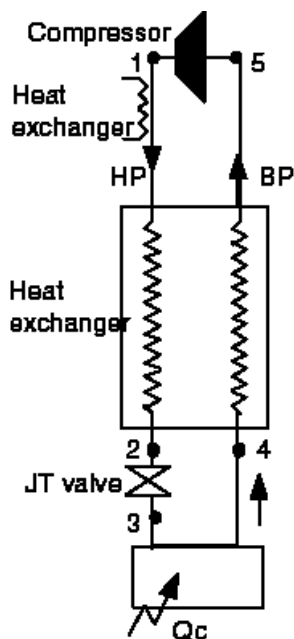


Рис.21. Принципиальная схема установки на цикле Джоуля – Томпсона.

жидкой фазы с нагрузкой позволяет реализовать условия, в которых температура на холодном конце зависит лишь от обратного давления в достаточно широком интервале тепловых нагрузок. Это позволяет весьма точно стабилизировать температуру нагрузки.

Для предохлаждения газа можно использовать устройства на эффекте Джоуля-Томпсона, но с другой рабочей жидкостью. Однако, в современных установках это достигается в двухступенчатом цикле Гиффорда-МакМахона. Кроме того, расход гелия в петле, по которой идет перенос гелия в части, работающей по Джоулю-Томпсону, составляет несколько процентов от массы гелия, используемой в ГМ цикле. Оптимальное давление гелия, обеспечивающего охлаждение при расширении составляет 1.5 –2 мбар, что в точности соответствует уровню высокого давления в ГМ цикле. Поэтому использование компрессора, сжимающего небольшое по массе количества

гелия с выхода расширителя цикла Джоуля-Томпсона (давление менее 0.1 МПа) до входного давления ГМ компрессора (0.6 –0.9 МПа) позволяет интегрировать две системы в замкнутый гелиевый цикл (см. Рис.22).

Установки такого типа имеются на рынке, дают порядка одного ватта полезной мощности при 4 К и используются для охлаждения SIS детекторов в космических аппаратах и наземных телескопах, а также для лабораторных исследований. Основная проблема этих устройств – засорение капилляров в Д-Т части, из-за присутствия в рабочем газе молекул воды и масла, попадающего из ГМ-частей устройства.

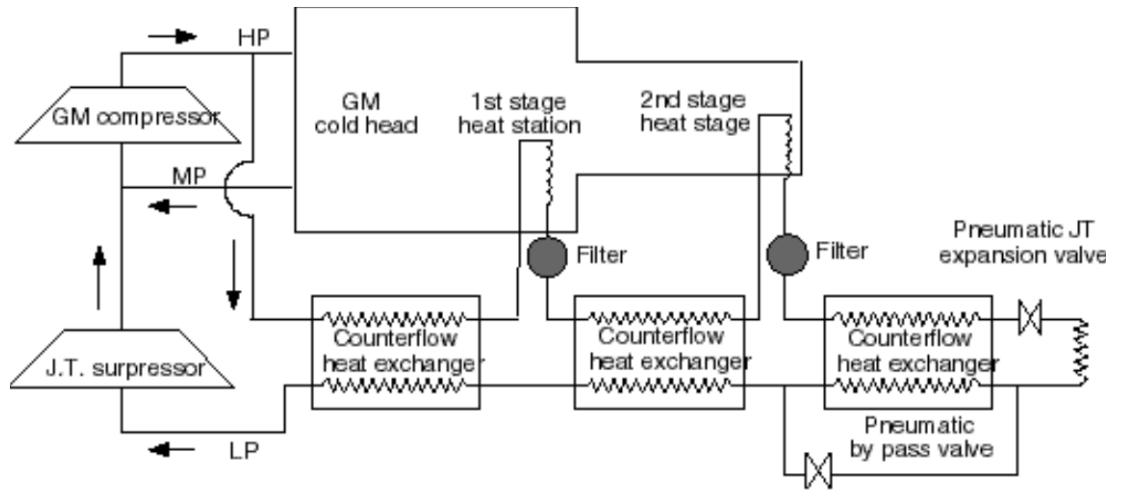


Рис.22. Принцип работы комбинированной установки замкнутого цикла на принципах Гиффорда – МакМахона и Джоуля – Томпсона.

6.1. Продукция компании Matra Marconi Space.

Компания ведет разработки в области охладителей для космических станций и спутников. Разработки базируются на исследованиях, проводимых в университете г.Оxford, Англия и лаборатория Резефорда (RAL). Продукция сертифицирована для ISAMS.

Имеются двухступенчатые охладители на цикле Стирлинга (20 К) и комбинированные трехступенчатые с охладителями с циклом Джоуля Томпсона в третьей ступени (4 К). Все устройства разработаны в рамках программ ESA (Европейское космическое агентство). Разработана специальная электроника для подавления вибраций, возникающих при работе охладителя.

Основные параметры

Криокуллер	Полезная нагрузка	Вес	Потр. мощность
на 50-80 К	1700 mW at 80 К 700 mW at 55 К	4.7 kg	50 Вт maximum
на 20 К	120 mW at 20 К	23 кг(с компрессором)	105 Вт
на 4 К	7 mW at 4.2 К	40kg(с компрессором)	165 Вт

Уровень вибрации – менее 0.22 Nrms, в том числе менее 0.044 Nrms на торце холодного пальца.

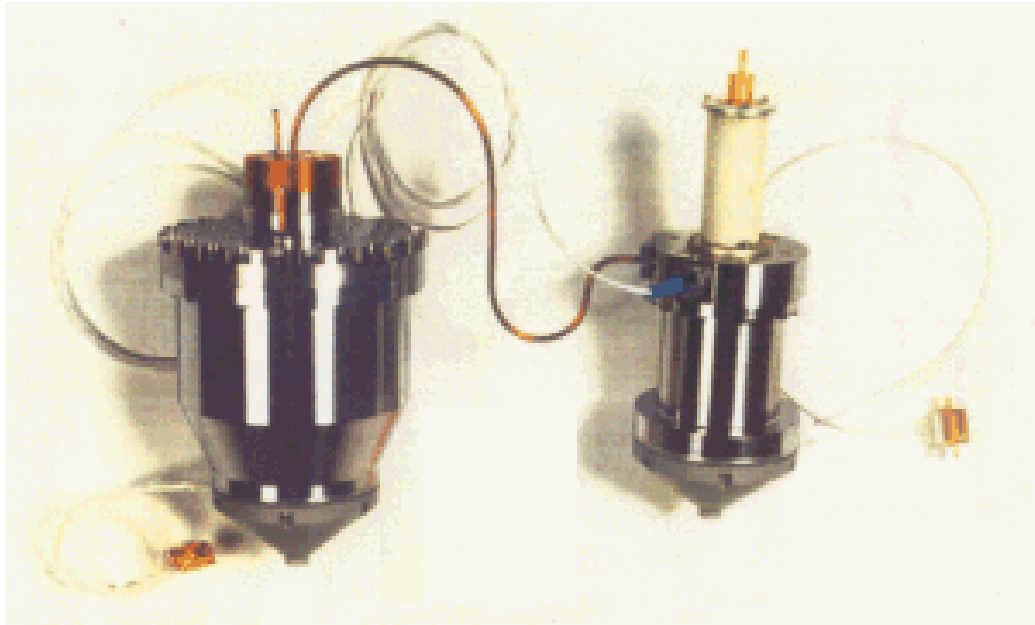


Рис.23. Внешний вид продукции компании Matra Marconi Space.

Охладители на 4 К будут использованы в проекте FIRST на инфракрасном космическом телескопе. Поставка спустя 15 месяцев после получения заказа. Контакт по адресу Mr Graham BAKER Product Manager-Cryogenic Matra Marconi Space Gunnels Wood road UK-SG1 2 AS Phone +44 1438 778 971 Fax +44 1438 778 969 e-mail: graham.baker@mmsuk.co.uk

6.2. Продукция компании CREARE.

Компания выпускает охладители на цикле Стирлинга с полезной мощностью от 1 мВт до 20 кВт в диапазоне температур до 4 К (<http://www.create.com/>).

6.3. Продукция компании ОАО СИБКРИОТЕХНИКА

Предназначены в основном для охлаждения приемников инфракрасного излучения.

Тип системы	*Замкнутая	*Разомкнутая
Температура охлад., К	до 80	до 80
Холодопроизводительность, Вт	0,5 – 10	1 - 100
Потребл. мощность, Вт	250 - 600	
Масса, кг	4,5 - 20	1,7 – 250

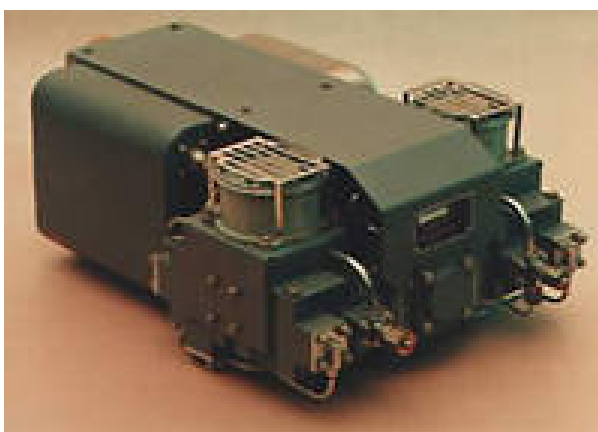




Рис.24. Охладительные установки на эффекте Джоуля-Томпсона компании ОАО СИБКРИОТЕХНИКА. Рабочая температура 77 К.

7. ВИХРЕВАЯ ТРУБКА (PULSE TUBE)

Обсужденные выше новые тенденции в развитии установок замкнутого цикла являются результатом эволюционного процесса развития. Вихревые трубки – это принципиально новая концепция в построении рефрижераторов.

Устройство вихревой трубки схематически представлено на Рис.25. Видно, что в нем имеется все элементы установок традиционных типов: компрессор с распределительным клапаном или генератор давления, генерирующие циклически изменяющееся во времени давление, и регенератор. Главная особенность – отсутствие движущихся частей в холодном пальце, который состоит из простой полой трубки. Осциллирующий в ней газ работает как газовый поршень. Производительность вихревой трубки главным образом определяется контролем за фазой движения этого газового поршня.

В первых устройствах [13] с закрытой трубкой производительность была невелика, поскольку контроль за разностью фаз между колебаниями генератора давления и движением газообразного поршня практически

отсутствовал. Охлаждение имело место лишь вследствие перекачки тепла вдоль стенок, ограниченной как по частоте, так и по объему. Микулин и др. [14] первыми предложили сделать отверстие в горячей части и буферный объем, что существенно повысило производительность. Радебах и др. [15] провели фазовый анализ и доказали, что роль буферного объема состоит в контроле сдвига фаз между колебаниями давления и осцилляциями газовой массы в трубке, позволяющем максимизировать энтальпийный поток между холодным и горячим концами трубы.

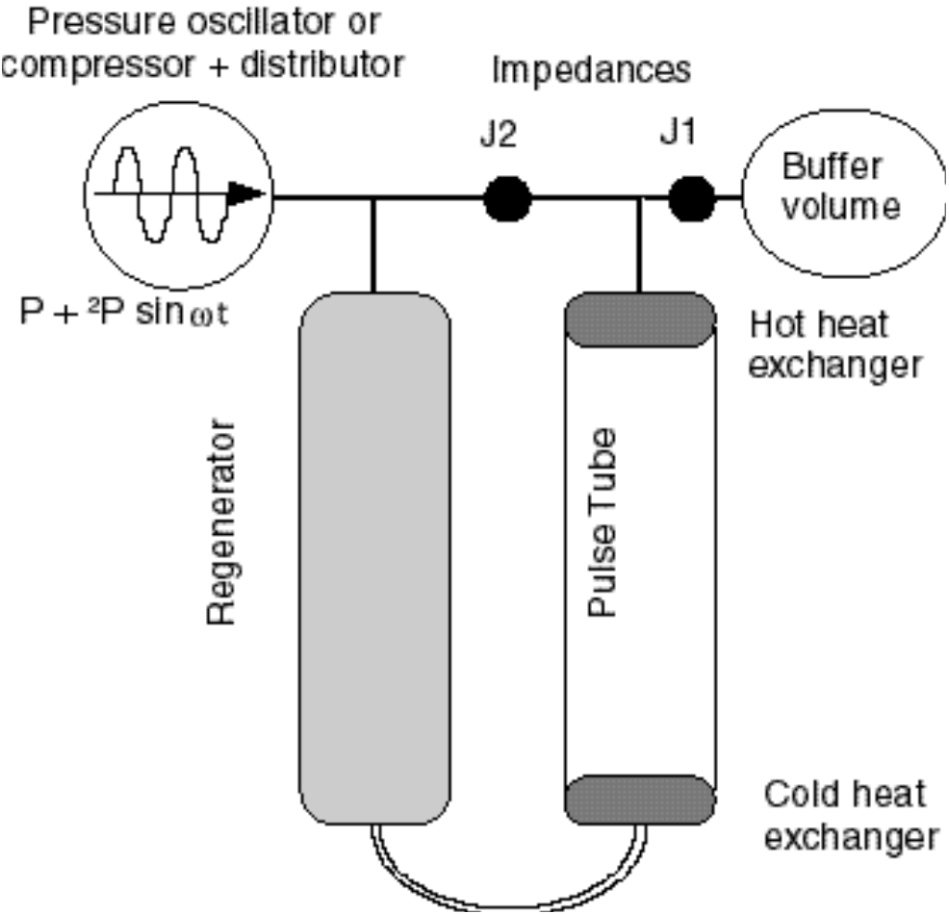


Рис.25.

Схема установки замкнутого цикла на базе вихревой трубки.

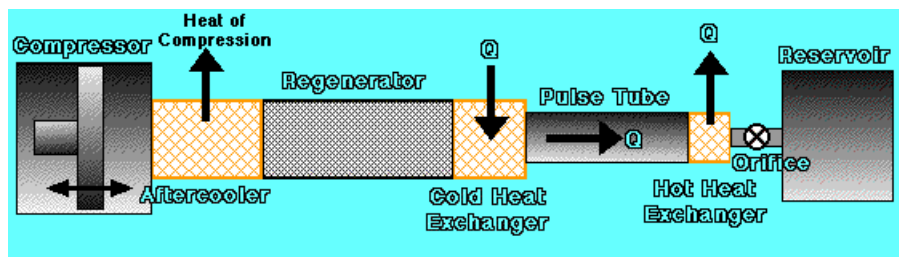


Рис. 26. Принципиальная схема работы Orifice Pulse Tube Cooler (импеданс J_2 на Рис.25 равен бесконечности, т.е. обратная связь отсутствует).

Принцип действия Orifice Pulse Tube Cooler (импеданс J_2 на Рис.25 равен бесконечности) иллюстрирует Рис. 26. В типичных конфигурациях «aftercooler» представляет собой выполненный из меди теплообменник, который уменьшает поток тепла из компрессора, обеспечивая более эффективную работу регенератора. Регенератор, представляет собой теплообменник, поглощающий выделяющееся в газе тепло на этапе его сжатия и отдающий накопленное ранее тепло на этапе расширения. Холодный теплообменник («cold heat exchanger») – наиболее холодная часть устройства, к которой подводится тепло из охлаждаемого объекта. В трубке («pulse tube») обеспечивается пульсация газа, которая при правильных фазовых соотношениях с колебаниями давления, приводит к транспорту тепла от холодного к горячему торцам трубки. Теплообменник удаляет тепло из системы. Диафрагма («orifice») и присоединенный через нее резервуар обеспечивают нужные фазовые соотношения.

Для работы устройства необходимо выполнение трех условий:

- газ должен достигать холодной точки с наименьшим количеством запасенного тепла (определяется энтальпийным потоком в регенераторе);

- амплитуда колебаний скорости движения газа и его давления в трубке должны быть достаточными для отбора тепла (поток энthalпии), поступающего от нагрузки;
- фазовые соотношения между давлением с скоростью газа в трубке должны обеспечивать отток тепла (энthalпии) от холодного конца к горячему.

Первые два условия противоречивы. Для улучшения теплообмена в регенераторе он должен быть наполнен пористым материалом (дробь, диски, проволоки), обеспечивающим максимально большую поверхность для теплообмена. Однако такой наполнитель обеспечивает высокое сопротивление газовому потоку и, следовательно, трудностям в отборе тепла от нагрузки. Нахождение оптимального компромисса между этими условиями – одна из основных трудностей конструирования данных устройств. Если трубка закрыта на горячем конце, то скорость движения газа в каждой ее точке должна быть достаточна для сжатия газа в оставшейся части трубки. Скорость газа оказывается сдвинутой по фазе на 90 градусов по отношению к колебаниям давления и отвод тепла от холодной части мал. Если диафрагма на горячем конце открыта, к прежней скорости добавляется компонента, находящаяся в фазе с колебаниями давления, что и обеспечивает отток тепла от нагрузки. Однако диафрагма не может быть открыта слишком сильно. Иначе не удастся поддерживать в трубке осцилляции давления газа необходимые для обеспечения эффективного отвода тепла от теплообменников.

На следующем этапе развития Зу [16] предложил концепцию устройства с двумя диафрагмами (Inlet Pulse Tube Cooler), что позволило далее повысить производительность благодаря уменьшению массы газа,

проходящей через регенератор и лучшему контролю фазовых соотношений (импеданс J_2 на Рис. 25 конечен).

Первые устройства сразу продемонстрировали целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными охладителями. Так отсутствие движущихся частей в холодном пальце привело к более простой технологии их изготовления, существенному подавлению вибраций, простоте интеграции в другие системы. Однако на первых порах они проигрывали в эффективности традиционным устройствам.

Дальнейшие исследования систем с двумя входными отверстиями [17], а также косвенные [18] и прямые измерения градиента температуры вдоль трубки и регенератора [19] показали, что в этой геометрии устанавливается постоянная во времени циркуляция газа в контуре, образованном трубкой и регенератором через соединяющий их импеданс (J_2). Этот эффект является паразитным, поскольку приходящий за его счет к холодному концу поток тепла даже с учетом того, что постоянный во времени поток газа составляет доли процента от основного осциллирующего потока, может быть порядка самого охлаждающего эффекта.

В вихревых трубках, работающих в конфигурации Гиффорда-МакМагона (компрессор с распределительным вентилем) добавление регулируемого игольчатого клапана между буферным объемом и компрессором позволяет вводить в систему контролируемый постоянный во времени поток газа, который способен скомпенсировать или полностью исключить паразитные процессы в контуре трубка – регенератор. В таком исполнении двухступенчатый охладитель на вихревых трубках оказывается эффективно работающим при гелиевых температурах [20].

В вихревых трубках, работающих по циклу Стирлинга с использованием более высокочастотного источника гармонически меняющегося во времени давления, также образуется паразитная постоянная

составляющая газового потока, которую труднее скомпенсировать. Примененное в данном случае решение сводится к разрыву линии обратной связи между трубкой и регенератором (double inlet configuration) и использованию более прецизионного согласующего элемента на горячем конце трубки.

Действительно, для эффективной работы устройства необходимо отсутствие разности фаз между колебаниями давления и осцилляциями газа в трубке. На ее горячем конце это достигалось введением отверстия (клапана) и буферного объема. Однако использование лишь этих компонентов не гарантировало выполнение правильных фазовых соотношений на холодном конце. Там фаза колебаний была сдвинута из-за наличия акустической массы в объеме трубки. Тем не менее, контроль за фазой колебаний газа на холодном конце может быть произведен путем введения капилляра [19] на горячем ее конце (см. Рис.27). Такой капилляр играет как роль сопротивления (обеспечивая на нем перепад давления), которое вместе с буферным объемом (емкость) контролируют нужную фазу колебаний горячего конца, так и роль инерционного элемента, обеспечивающего правильные фазовые сдвиги на холодном конце. Линия обратной связи оказывается лишней и с ее устранением прекращаются паразитные эффекты по постоянной составляющей.

Данное решение эффективно лишь для вихревых трубок, работающих на высокой частоте по циклу Стирлинга и не может быть применено в низко частотных устройствах типа Гиффорда-МакМахона. В последнем случае для контроля процессов на холодном конце должны быть применены другие решения, например четырехвентильные устройства [22] или технологии активных буферов [23].

Понимание имеющихся в вихревых трубках паразитных явлений и важности фазового контроля на как на горячем, так и на холодном концах

позволило уже сейчас создать эффективные установки замкнутого цикла для космических приложений [24] – несколько ватт полезной мощности на 50 –80 К -, наземные низкочастотные устройства с циклом Гиффорда-МакМахона с параметрами 100 – 160 Вт при 80 К [22,25], 10 Вт/15 К + 40 Вт/50 К [26]. С использованием магнитных материалов получено 05 Вт при 4..2 К [20].

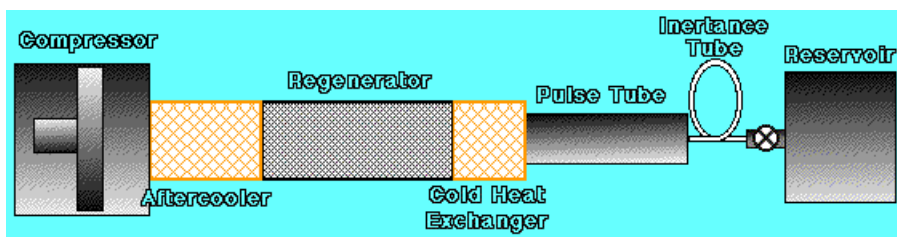


Рис.27. Охладитель со сложным согласующим элементом в горячей части трубки.

7.1. Продукция компании Leybold Cryogenics.

Компания Leybold ведет активные разработки в области создания охладителей на вихревых трубках. Объявлено о создании следующих прототипов, работающих на цикле Гиффорда-МакМахона.

Таблица 2

Прототип	Тип Компрессора	Материал регенератора второй ступени	Производительность		
			Рабочая температура		Полезная мощность
			1 ступень	2 ступень	
1	2x Leybold Coolpak (2x6кВт)	33% свинец, 66% ER ₃ Ni	34 К	3,85 К	500 мВт при 5.2 К 60 Вт при 50 К
2	Leybold Coolpak (2x6кВт)	33% свинец, 33% ERNi, 33% HoCu ₂	35.9 К	2.95 К	300 мВт при 4.2 К 30 Вт при 50 К

7.2. Продукция компании JECC TORISHA Co.,Ltd

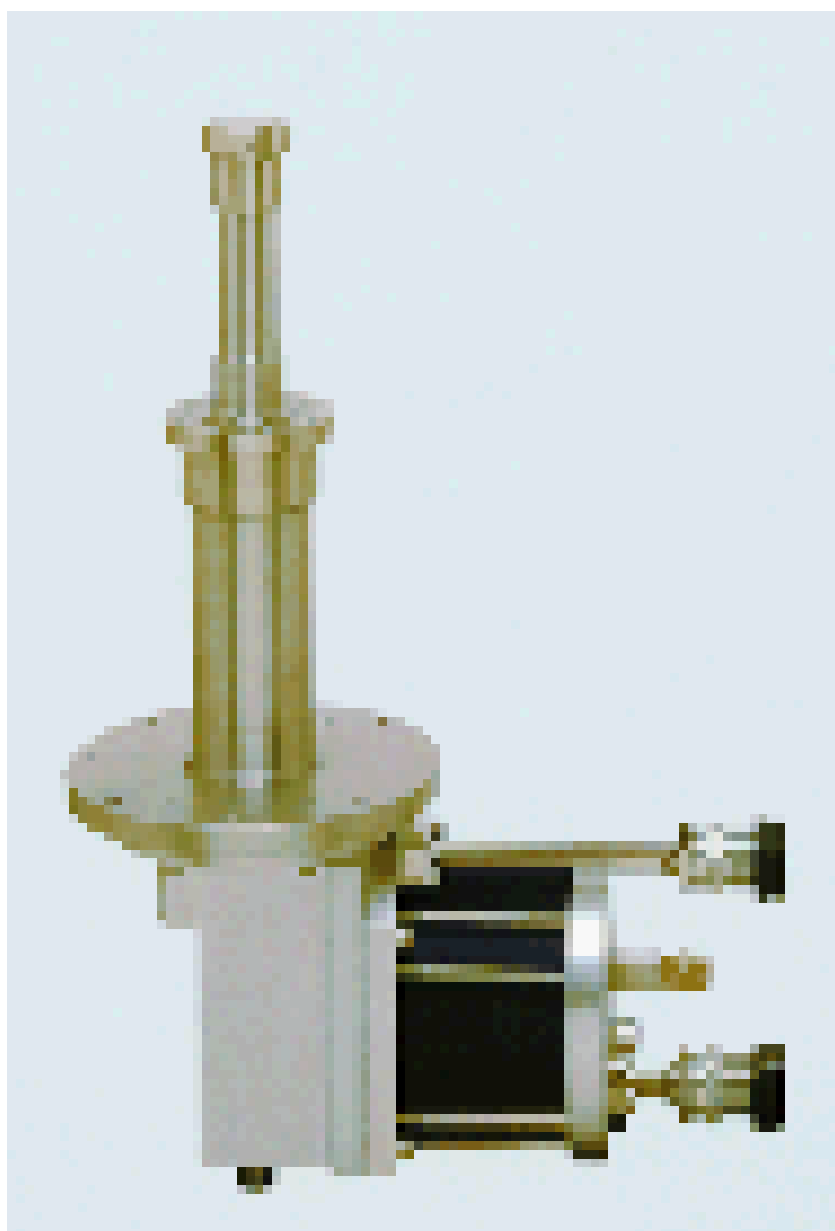


Рис.28. Pulse tube охладитель на 4 К, разработанный компанией JECC TORISHA Co.,Ltd, являющейся составной частью компании Suzuki.

7.3. Продукция компании RICON



Рис. 29.

Пяти киловаттный компрессор и одно (77 К) и двухступенчатые (5W @20К + 100W @ 77К) охладители на вихревых трубках, работающих по принципу Гиффорда МакМахона.



Рис.30.

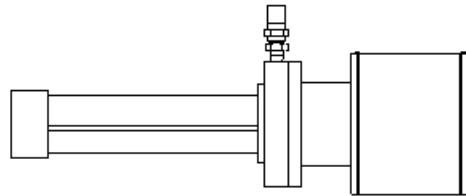
Новая разработка фирмы RICON для работы при 5 К.

7.4. Продукция компании KELVINIC.

IWATANI - KELVIN CRYOCOOLERS Revised: November 21, 1998

Pulse Tube Refrigerator (PTR) Cryocoolers

Item No.	Head Model No.	Q, watts		Ult. Temp.		Time to T _{ult.} , min	Wgt., kg	Dimensions		Comp. Model No.	AC Power, watts
		1st @77K	2nd @20K	1st, K	2nd, K			L, mm	Dia., mm		
13	P201	5 @123K		77		25	1.2	200	79	CA201	800
14	P201	5 @123K		77		25	1.2	200	79	CW301	700
15	P301	2		55		30	1.3	250	79	CA201	800
16	P301	2		55		30	1.3	250	79	CW301	700
17	P301	10		60		30	1.3	250	79	CW303	2300
18	2xP050	25+		55		35	6	375	123	CW303	2300
19	2xP050	50+		55		60	6	375	123	CW306	4600
20	P050	15+		55		35	6	375	123	CA201	800
21	P050	15+		55		35	6	375	123	CW301	700



Helium Compressors for Solvay, PTR, and LN₂ Systems

Item No.	Comp. Model No.	AC Power, watts	VAC (1Φ) 60Hz	Dimensions			Wgt., kg	Gas Flow, scfh	Water Flow, L/hr
				W, mm	D, mm	H, mm			
21	CA201	800	110	330	400	386	36	—	
22	CW301	700	110	380	420	445	45	—	100
23	CW303	2300	220	313	565	660	75	—	200
24	CW306	4600	220	450	585	697	130	—	400

Sold by: Kelvin International Corporation

P.O. Box 4006 - Hampton, VA 23664 USA

Tel: (757) 851-6215 or (800) 8-KELVIN

Fax: (757) 851-5212 or (888) 8-KICFAX

e-mail: info@kelvinic.com

Web site: www.kelvinic.com



Рис.31

Внешний вид продукции компании KELVINIC

8. ВЫРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ВЫБОРУ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОЕКТИРУЕМЫХ МОДУЛЕЙ.

Основываясь на проведенном в разделе 3.7.3.2. анализе принципов работы и современного уровня развития научно-исследовательской и производственной базы современных охладительных установок замкнутого цикла можно сформулировать следующие заключения и рекомендации.

Установки, использующие цикл Джоуля – Томпсона.

К преимуществам устройств, использующий данный цикл следует отнести:

- отсутствие движущихся частей;
- квазистационарность процесса и связанное с этим отсутствие вибраций;
- перенос холода на большие расстояния;
- возможность минитюаризации холодного конца;
- возможность обеспечения высокой температурной стабильности.

Недостатками данных устройств являются:

- использования неидеальности поведения реальных газов, в качестве основного принципа действия;
- необходимость создания высокой разницы начального и конечного давлений (порядка 200:1 для чистых газов и 25:1 для смесей (азот – метан, этан, пропан, изобутан; He – неон, аргон, ксенон и т.д.));

- возможность частого засорения калиброванных отверстий для выпуска газа.

Для получения гелиевых температур могут быть использованы на конечной ступени охлаждения в качестве третьей ступени устройств, работающих на циклах Стирлинга или МакМахона.

Установки, использующие цикл Стирлинга.

К преимуществам устройств, использующий данный цикл следует отнести:

- высокую эффективность;
- относительно низкую стоимость;
- небольшие габариты и вес;
- большой объем продаж (в основном как составных частей инфракрасных детекторов военного назначения).

Недостатками данных устройств являются:

- невозможность достижения гелиевых температур без окончных каскадов, работающих на других принципах;
- невозможность использования смазки в движущихся частях и связанный с этим быстрый износ;
- дорогостоящее поддержание долговременной работы;
- относительно малый ресурс (устройства с компрессором линейного типа – 5000 часов, с ротационным возвратно-поступательном компрессоре – 2500 часов).

Для получения гелиевых температур могут быть использованы на начальных ступенях (1 или 2) охлаждения в устройствах, использующих цикл Джоуля – Томпсона в третьей ступени. Устройства такого типа разрабатываются для использования в космических аппаратах.

Установки, использующие цикл Гиффорда - МакМахона.

К преимуществам устройств, использующий данный цикл следует отнести:

- высокие эксплуатационные характеристики (надежность, большое время наработки на отказ по сравнению с описанными выше установками);
- относительно небольшие цены (\$40,000) и развитые системы обслуживания;
- большой объем продаж и опыт эксплуатации;
- возможность достижения гелиевых температур в двухступенчатых конфигурациях.

Недостатками данных устройств являются:

- большие масса – габаритные параметры (вес с компрессором – 120 – 150 кг, размер компрессора – 30x40x60 см, охлаждающей головки – 40x45x45 см);
- наличие внутренних вибраций, вызванных движением дисплейсера;
- наличие магнитных материалов в регенераторе;
- невысокая стабильность поддержания температуры (200 – 400 мК) в отсутствие специальных радиаторов;
- низкая эффективность;

Необходимо отметить, что в России имеется производитель устройств такого типа, рассчитанных на рабочую температуру до 10 К. По всей видимости, небольшая модернизация выпускаемых им изделий, фактически сводящаяся к замене материала наполнителя в регенераторе на смесь, содержащую помимо свинцовой дроби фрагменты с редкоземельными материалами, позволит понизить температуру до 4 К, т.е. создать устройства, конкурирующие с изделиями такого типа, продающимися на рынке США. Производителем необходимых материалов является Япония, фактически поставляющая фирмам США как данные материалы, так и компрессоры комплектующие охладительные установки замкнутого цикла.

Прямое использование данных установок для охлаждения сверхпроводниковых модулей невозможно. Потребуется дополнительные разработки, направленные на подавление вибраций, улучшение температурной стабильности, разработку систем экранирования паразитных магнитных полей. Эти разработки должны базироваться на исследованиях работоспособности цифровых сверхпроводниковых устройств в реальных охладителях такого типа.

Установки, использующие вихревые трубки (Pulse tube cryocooler).

К преимуществам устройств, использующий данный цикл следует отнести:

- наиболее высокую из имеющихся устройств эффективность;
- отсутствие каких-либо движущихся частей в холодной части устройства;
- отличные масса габаритные параметры (Разработка IMAS компанией TRW - 0.5 Вт при 55К при 51 Вт входной мощности, общем весе 3,2 кг и размере 20x5x20 см.)

- низкий уровень вибраций;
- высокая надежность;
- низкая стоимость.

Недостатками данных устройств являются:

- сравнительно недавнее появление на рынке (первые коммерческие устройства на 77 К – 1995 г., на 4 К – 1999 г.);
- возможные коллективные нестабильности в газе, заключенном в трубке;
- ограничения на размер для обеспечения высокоэффективной работы (не важно для слаботочных применений).

Данные устройства являются наиболее перспективными для криостатирования цифровых сверхпроводниковых устройств. Их высокая эффективность вполне позволяет осуществить необходимый отвод тепла (порядка 0.1 – 0.2 Вт при 4.2 К и входной мощности на уровне сотен ватт), примерно в 3 – 5 раз меньшие геометрические размеры, малый вес, отсутствие вибраций и магнитных материалов в холодной части позволят достичь более высоких эксплуатационных параметров, чем в традиционных устройствах, базирующихся на цикле Гиффорда – МакМахона. Необходимые охладители на 4 К уже сейчас являются коммерческим продуктом и имеются на рынках США (RICON) и Японии (JECC TORISHA Co.,Ltd). По крайней мере еще 4 фирмы заявили о выпуске в продажу данных устройств до конца этого года (RICON, Leybold Cryogenics, Iwatani Kelvenic)).

Желательные параметры криогенных микрорефрижераторов (более точные параметры должны быть согласованы с конкретными разработчиками изделия)

Габариты	< 40x40x60 см
Вес	< 70 кг
Полезная нагрузка	0.25 Вт
Время выхода на рабочий режим	< 2 часов
Входная мощность	< 1 кВт
Температурная стабильность	< 50 мК
Надежность/время проф. обслуж.	>5 лет/1-3 года
Магнитный шум	< 1 Gauss
Цена	< 10 000\$

Вышеизложенное позволяет с уверенностью констатировать, что современный уровень развития криогенных микрорефрижераторов, позволит в самое ближайшее время обеспечить выполнение условий, необходимых для работы цифровых сверхпроводниковых устройств.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. R. Li, O. Yoshida, and T. Hashimoto, "Measurement of ineffectiveness on regenerators packed with magnetic regenerator materials between 4 and 35K." *Advances in Cryogenic Engineering*, v 35, p 1183-9, 1990.
2. Fieldler A., Gerban J. and Haefner H.U., 1998, Efficient single stage Gifford Mac Mahon refrigerator operating at 20 K, *Adv. Cryo. Eng.*, CEC, vol. 43 : p. 1823-1829.
3. N. Tozai, "Recent progress in 4.2-K G-M refrigeration." *Superconductor Industry*, Winter 1996 issue, pp 53-4.
4. Workshop on Military and Commercial Applications for Low Cost Cryocoolers sponsored by the Electronic Industries Association in cooperation with DARPA, NRL and NVESD, 1998, San Diego, CA.
5. M. Nagao et al., "Helium liquefaction by a Gifford-McMahon cycle cryocooler." *Advances in Cryo. Engr.*, v 35, pp 1251-60, 1990.
6. T. Kuriyama et al., "Helium liquefaction by a two-stage Gifford-McMahon-cycle refrigerator using new regenerator material of Er₃Ni." *Jpn. J. Appl. Phys.*, v. 31, pp L1206-8, 1992.
7. Kurihara T., Okamoto M., Sakitani K., Torii H. and Morishita H., 1998, Numerical and experimental study of a 4 K modified solvay cycle cryocooler, *Adv. Cryo. Eng.*, CEC, vol. 43 : p. 1791-1798.
8. J. Chafe, G. Green, and R. Riedy, "Neodymium regenerator test results in a standard Gifford-McMahon refrigerator." Conference paper, exact source unknown, 1993. (Navy-Balzers collaboration.)
9. R. Plambek, N. Thatte, and P. Sykes, "A 4K Gifford-McMahon refrigerator for radio astronomy." 7th International Cryocooler Conference, 1992.

- 10.Lang A., Häfner H.U. and Heiden C., 1998, Systematic investigations of regenerators for 4.2 K refrigerators, *Adv. Cryo. Eng.*, CEC, vol. 43 : p. 1573-1580.
- 11.Jewell C., 1997, Overview of cryogenic developments in ESA, Proceedings of the 6 th European Symposium on Space Environmental Control Systems Noordwijk, ESA SP-400 August 97
- 12.R. Plambek, "Long-term performance of 4K Gifford-McMahon refrigerators on the BIMA array." Cryogenic Engineering Conference, Portland, July 1997.
- 13.Gifford W.E. and Longsworth R.C., 1964, Pulse tube refrigeration, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, vol. 86 : p. 264.
- 14.Mikulin E.I., Tarasov A.A. and Shkrebyonock M.P., 1984, Low temperature expansion pulse tubes, *Adv. Cryo.Eng.*, CEC, vol. 29 : p. 629.
- 15.Radebaugh R. and Storch P.J., 1988, Development and experimental test of an analytical model of the orifice pulse tube refrigerator, *Adv. Cryo. Eng.*, CEC, vol. 33 : p. 1191.
- 16.Zhu S., Wu P. and Chen Z., 1990, A single stage double inlet pulse tube refrigerator capable of reaching 42 K, *Proceedings 13 th ICEC*, Beijing, p. 257.
- 17.Gedeon D., 1997, DC gas flows in Stirling and pulse tube cryocoolers, *Cryocoolers 9*, Plenum Press, New York, p. 385-392.
- 18.Chen G. and al., 1997, Modification test of staged pulse tube refrigerator for temperatures below 4 K, *Cryogenics*, vol. 37, no 9 : p. 529-532.
- 19.Duband L., Charles I., Ravex A. and Jewell C., 1998, Experimental results on inertance and permanent flow in pulse tube coolers, *Cryocoolers 10*, Plenum Press, New York, to be published Charles I., Duband L. and Ravex A., *Cryogenics*, vol. 39, p. 77-782
- 20.Wang C., Thummes G. and Heiden C., 1998, Performance study on a two stage 4 K pulse tube cooler, *Adv.Cryo. Eng.*, vol. 43 : p. 2055-2062.

21. Gardner D.L. and Swift G.W., 1997, Use of inertance in orifice pulse tube refrigerators, 1997, *Cryogenics*, vol.37, no 2 : p. 117-121.
22. Matsubara V., Tanida K., Gao J.L., Hiresaki Y. and Kaneko M., 1993, Four valve pulse tube refrigerator, *Proceedings of 4th Joint Sino-Japanese Seminar on Cryocoolers*, Beijing, p. 54-58.
23. Zhu S., Yakimi Y. and Matsubara Y., 1997, Investigation of active buffer pulse tube refrigerator, *Cryogenics*, vol. 37, no 8 : p. 461-471.
24. Burt W.W. and Chan C.K., 1997, New mid-size high efficiency pulse tube coolers, *Cryocoolers 9*, Plenum Press, New York, p. 173-182.
25. Ravex A., Poncet J.M., Charles I. and Bleuzé P., 1998, Development of low frequency pulse tube refrigerators, *Adv. Cryo. Eng.*, vol. 43 : p. 1957-1964.
26. Ravex A., Poncet JM. and Charles I., Development of single and double stage low frequency pulse tube, Presented at ICEC 18, Mumbai, To be published.

ООП ФИЗ. Ф-ТА МГУ

Зак