

УДК 621.5

С. А. Засуха¹, Н. И. Лихолит², А. Л. Макаров³, Ю. О. Меленевский⁴, В. Т. Архипов⁴, В. Е. Шатихин¹

¹ Державне космічне агентство України, Київ

² Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», Київ

³ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

⁴ Науково-технічний центр криогенно-космічних технологій «Кріокосмос», Харків

КРИООХЛАДИТЕЛЬ СПЛИТ-СТИРЛИНГ ДЛЯ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

Описан опытный образец криоохладителя Сплит-Стирлинг, разработанный, изготовленный и испытанный Центром «Криокосмос» совместно с КП СП «Арсенал» и ГП «КБ Южное». Приводятся параметры криоохладителя, из которых видно, что его характеристики зависят от резонансных характеристик компрессора и охладителя, от соотношения объемов полостей машины, от давления и частоты работы машины. Параметры машины зависят также от параметров питающего напряжения (тока), от тепловой нагрузки и температуры охлаждения объекта. Приводятся также особенности подготовки системы к работе. Исследования работы опытного образца позволяют определить оптимальные пути его дальнейшего совершенствования. Результаты исследования дадут возможность потребителям и разработчикам подобных охладителей лучше понимать процессы, протекающие в машине.

ВВЕДЕНИЕ

Работа инфракрасных приборов в значительной мере зависит от надежной работы охлаждаемых устройств, обеспечивающих поддержание криогенных температур фотоприемных устройств (ФПУ) в заданном диапазоне. К другим требованиям, предъявляемым к охлаждаемым устройствам, относятся также скорость выхода на температуру охлаждения, стабильность температуры охлаждения, отсутствие вибраций, ресурс работы, энергопотребление и вес.

В настоящее время этим требованиям отвечают охладители, работающие по обратному циклу Стирлинга в модификации Сплит-Стирлинг. Основой их недостаток — возможные вибрации, связанные с тем, что у охладителя, на головке которого крепится на тепловой контакт ФПУ, имеется подвижный поршень с регенератором. Даже если поршень движется возвратно-посту-

пательно в направлении, куда направлено ФПУ, вибрация может появиться даже если жестко закрепить охладитель с ФПУ к объективу.

В ряде случаев на смену охладителей Сплит-Стирлинг приходят охладители, использующие пульсационные трубки, у которых нет подвижных частей в охладителе, но есть свои недостатки, в частности увеличенное время выхода на тепловой режим и короткая трубопроводная связь с компрессором, который является потенциальный источником вибраций.

Центр «Криокосмос», совместно с рядом украинских организаций, несколько лет занимается разработкой фотоприемной аппаратуры различного применения и охладителями для нее. Некоторые особенности Сплит-Стирлинга, полученные нами, могут быть полезны для работы их разработчикам и пользователям.

Система Сплит-Стирлинг состоит из компрессора, соединенного герметичной трубкой с охладителем, и блока управления. К охладителю может крепиться вакуумируемый сосуд с входным окном, через которое поступает обрабатываемый сигнал. Блок управления по кабелям,

© С. А. ЗАСУХА, Н. И. ЛИХОЛИТ, А. Л. МАКАРОВ,
Ю. О. МЕЛЕНЕВСКИЙ, В. Т. АРХИПОВ,
В. Е. ШАТИХИН, 2014

идушим от датчиков, установленных в компрессоре и охладителе системы, получает данные о ходе поршней компрессора, о ходе поршня охладителя, о температуре охлаждаемого объекта. В соответствии с этими параметрами блок подает электрическое питание на силовые электрические катушки компрессора, находящимися в магнитном поле постоянных магнитов, т. е. компрессор является активным агрегатом системы охлаждения, от которого зависит рабочая частота и изменение давления во всей системе.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ОХЛАДИТЕЛЯ

Разработанный и изготовленный опытный образец охладителя типа Сплит-Стирлинг для охлаждения ФПУ, показанный на рис. 1, был сделан по принципу, описанному выше.

Опытный образец включал в свой состав компрессор, охладитель и блок управления, соединенный трубопроводом и кабелями. Линейный компрессор имел два оппозитных поршня диаметром 14 мм, перемещавшихся в одном цилиндре под действием подвижных электрических катушек, питаемых блоком управления переменным электрическим током с заданной частотой. Напряжение питания самого блока управления составляло 27 ± 4 В.

Центрирование поршней и поддержание зазоров между поршнями и цилиндрами обеспе-

чивалось шариковыми направляющими, заключенными в специальных сепараторах. Эти шариковые направляющие обеспечивали сохранение зазоров, когда в них нет газового потока, и отсутствует усилие, обеспечивающее исключение контакта между поршнями и цилиндром. Начальное положение поршней и ограничение их движения в мертвых точках определялось также действием пружин, закрепленных на штоках поршней. Токовые катушки находились в постоянном магнитном поле, образованном постоянными магнитами и магнитопроводами, закрепленными в корпусе компрессора. Электрическое питание на силовые катушки подавалось через пружинные токоподводы. Регулирование хода поршней компрессора обеспечивалось силой тока, подаваемого на силовые катушки поршней, массой подвижных частей поршней, идентичностью магнитов, создающих магнитное поле вокруг катушек, противодействующей силой, создаваемой разностью давлений над и под поршнями, и пружинами, фиксирующими начальное положение поршней. На штоках поршней были закреплены электромагнитные датчики положения, фиксирующие крайние положения поршней и подающие данные об их положении на блок управления.

Охладитель Сплит-Стирлинг имел один поршень, внутри которого был расположен регенератор. Положение поршня и его движение определялось жесткостью пружины, закрепленной на поршне и в корпусе охладителя, массой поршня и разностью давлений над поршнем и под штоком поршня. Давление вокруг поршня охладителя определял компрессор, а давление под штоком поршня оставалось примерно постоянным и равнялось примерно среднему давлению в системе. Но на эту разность давлений влияло также гидравлическое сопротивление регенератора, уплотнение штока, а по времени — сопротивление трубопровода, соединяющего компрессор и охладитель.

Для обеспечения постоянства зазора между стенками цилиндра и поршнем охладителя также использовались шариковые направляющие с сепаратором, которые обеспечивали длительный ресурс работы машины. Регенератор, который

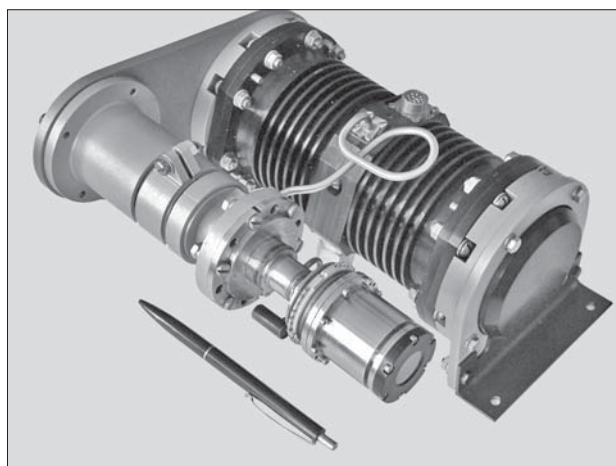


Рис. 1. Опытный образец охладителя типа Сплит-Стирлинг для охлаждения фотоприемных устройств

находился в поршне охладителя, состоял из сетчатой насадки, изготовленной из фосфористой бронзы. Наружный диаметр цилиндра охладителя составлял 8 мм, его длина — 81 мм, а теплообменник, к которому присоединялся на тепловой контакт объект охлаждения, — 10 мм. На штоке поршня охладителя устанавливался датчик положения, который давал сигнал об ограничении хода поршня.

Особенностью систем охлаждения, кроме малых размеров и конструктивных сложностей конструкции, являлось то, что рабочая полость машины, заполненная рабочим газом — гелием, не должна содержать никаких посторонних газов, которые будут оседать на холодной части регенератора, ухудшая теплообмен главного теплообменника системы. В первую очередь это влага, а также углекислота и пары более тяжелых веществ, в частности масел и полимеров. Удалить их сложно, а набрать очень легко, особенно учитывая развитую поверхность регенератора и малые сечения откачных трубопроводов. Особенно опасна влага, которая постоянно есть в воздухе и активно адсорбируется развитыми поверхностями машины при ее изготовлении и сборке.

Также сложным местом конструкции являются зазоры между поршнями и цилиндрами машин. Эти зазоры должны быть минимальными, но не должно быть касания подвижных деталей поршней стенок цилиндров, так как это вызывает лишние затраты потребляемой мощности, износ поверхностей и загрязнение рабочего объема продуктами износа. Эта задача особенно усложнялась тем, что система должна работать в широком температурном диапазоне окружающей среды от -50 до $+60$ °С, не говоря о том, что температура охлаждаемого устройства должна понижаться примерно от 300 до 75 К. При этом охлаждение должно идти быстрым темпом.

Для решения задачи обеспечения малых зазоров мы использовали проверенный нами вариант шариковых направляющих, который хотя и требует высокой точности изготовления деталей поршней и цилиндров, но дает положительный результат. В данном случае задача несколько упрощается тем, что шарики можно подбирать под размер изготовленного зазора. Материалы и износостойкие пок-

рытия приходилось выбирать с учетом диапазона рабочих температур и конкретных требований к рабочим условиям эксплуатации.

Пока ресурс работы машин исчислялся сотнями часов, можно было находить компромиссы в рамках обычных конструктивных решений. Но с увеличением ресурса до нескольких тысяч часов и ужесточением требований по весу и энергопотреблению пришлось принимать дополнительные меры по совершенствованию машин, по поиску новых материалов и покрытий, по поиску новых конструктивных решений. В опытном образце решение вопроса исключения примесей газов решалось выбором материалов и покрытий, промывкой спиртом всех деталей перед сборкой, а также увеличением времени откачки рабочей полости системы. Одновременно с откачкой проводился прогрев системы до 100... 110 °С и выше. Для вакуумирования системы использовались только безмасляные средства откачки с давлением на выходе до 10^{-3} ... 10^{-5} Торр. Также принимались меры по увеличению проходного сечения каналов вакуумирования, обеспечивающих откачку регенератора и полостей, примыкающих к рабочей полости охладителя. Одновременно принимались меры по обезгаживанию трубопроводов, по которым напускался в систему гелий высокой чистоты.

Используя принятые решения, нам удалось пройти ресурс работы 30 тыс. часов и получить приемлемые результаты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА ОХЛАДИТЕЛЯ

Для обеспечения времени выхода на температурный режим меньше 5 мин мы ввели в блоке управления питанием функцию увеличения либо уменьшения тока питания на электрические катушки компрессора от температуры объекта, в пределах ограничения на потребляемую мощность. Кроме того, было принято начальное значение мощности на уровне 20 Вт. Все это обеспечило сокращение времени выхода на рабочий режим до 4.5 мин при $T = 300$ К. График выхода охладителя на рабочий режим показан на рис. 2. На графике приведена также потребляемая мощность машины в процессе выхода на режим. Надо

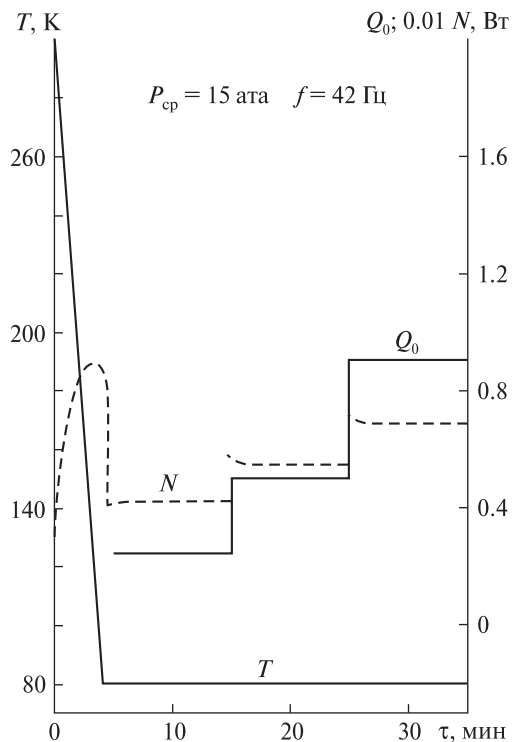


Рис. 2. Выход системы на режим: T — температура объекта, N — потребляемая мощность, Q_0 — нагрузка объекта

учесть еще и тот факт, что в машине имеется запас по выходу на режим в виде лишней массы головки охладителя (донышко и стенки охладителя) порядка 2...2.5 г, который был сделан с учетом массы предполагаемого объекта охлаждения. Также на графике показан переход на повышенные мощности полезной нагрузки от 0.25 до 0.9 Вт. Графики даны при частоте 42 Гц, среднем давлении 15 ата и напряжении питания –27 В.

Особенностью охладителей Сплит-Стирлинг являлось то, что движение поршня охладителя и его угол сдвига относительно компрессорных поршней зависели от разности давлений в полости поршня и в объеме пружинного устройства, от гидравлического сопротивления соединительной трубки и регенератора и от резонансных характеристик системы. Поэтому приходилось строго согласовывать конструкцию машин и рабочую частоту системы охлаждения для получения нужной производительности и минимальной потребляемой мощности компрессора. Для

этого необходимо было согласовывать питание, подаваемое на силовые катушки компрессора, и резонансные характеристики компрессора и охладителя, чтобы при их совместной работе при рабочем давлении системы главная сила, движущая поршень охладителя, — разность усилий, действующая на площадь поршня и его шток — была максимальной и могла максимально использоваться в рабочем цикле машины.

Обычно определяющей частотой системы является резонансная частота охладителя, так как он определяет холодопроизводительность и температуру охлаждения системы. В нашем случае она равна 40...43 Гц при среднем давлении в системе 12...16 ата. Понижение или превышение этой частоты приводило к увеличению потребляемой мощности компрессором, что можно связать с тем, что система работает не в оптимальном режиме. При этом с повышением частоты система из режима обратного цикла Стирлинга переходит в цикл прямого получения работы с выделением тепла, поршень охладителя какое-то время пытается удержаться в режиме получения холода с учетом теплоемкости системы, а потом охладитель более резко повышает свою температуру.

Перемещение поршней в значительной мере зависит от конструкции магнитной системы и токовых катушек компрессора, а также от электрического тока, подаваемого в них блоком питания во время охлаждения объекта и основной работы системы. С одной стороны, поршни не должны соударяться друг с другом и со стенками машины, а с другой — есть жесткие требования к временным характеристикам системы. В опытном образце охладителя для нормальной работы системы были установлены датчики температуры объекта охлаждения, а также положения поршней компрессора и охладителя, показания которых использовались в программах управления питанием силовых катушек компрессора.

По показаниям датчиков перемещения поршней можно судить о характере процессов, происходящих в системе охлаждения за один цикл. В частности, на рис. 3, а приведены осциллограммы перемещения компрессорных поршней и поршня охладителя при начальном охлаждении

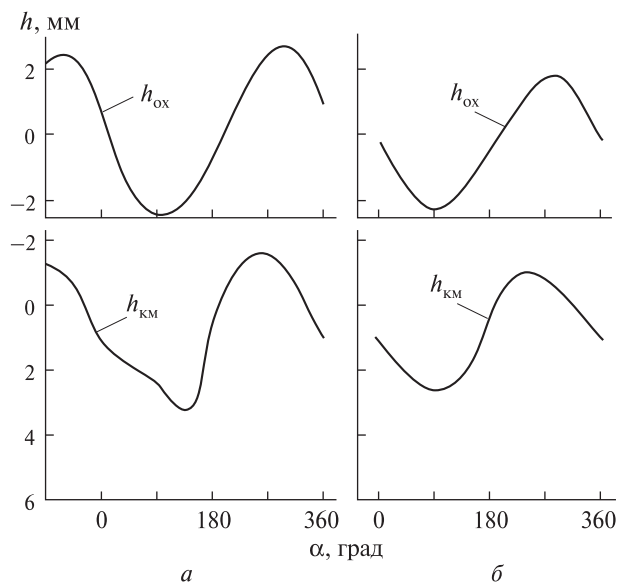


Рис. 3. Перемещение поршней охладителя и компрессора: h_{ox} — перемещение поршня охладителя, $h_{\text{км}}$ — перемещение поршня компрессора

машины (температура охладителя примерно 181 К, среднее давление 15 ата, частота 40.5 Гц), а на рис. 3, б — при выходе системы на рабочий режим. В частности, по изменению характера графиков движения компрессорного поршня в режиме охлаждения и движению поршня охладителя можно судить об увеличении холодной полости охладителя, о сохранении электрической мощности и о резком изменении направлении электрического тока в силовых катушках без изменения гидравлического сопротивления внешних линий. В тоже время движение поршня охладителя реагирует на эти изменения с некоторой задержкой из-за наличия сопротивления соединительного трубопровода. Характер хода компрессорных поршней изменяется при неизменной частоте, но с увеличением тепловой нагрузки на систему охлаждения. При этом исчезают волны на графике хода поршней компрессора, а весь график становится похож на синусоиду. Также с увеличением частоты эти отклонения уменьшаются, что может быть связано с приближением к резонансу компрессора и недостатком холода в системе, так как с дальнейшим увеличением частоты сдвигается положение максимума

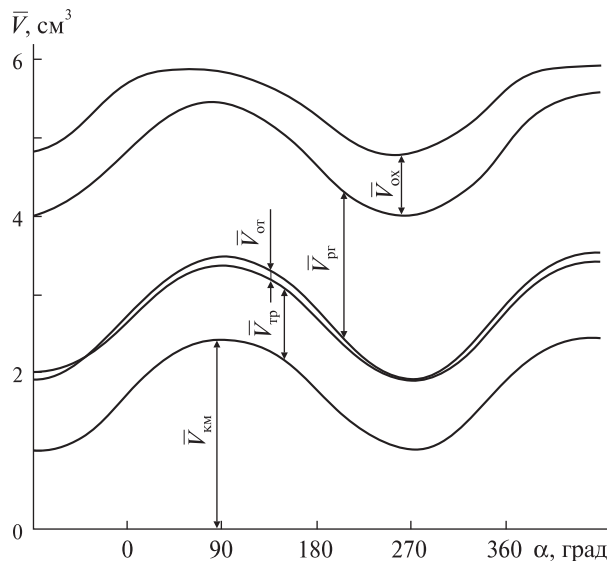


Рис. 4. Приведенные объемы полостей опытного образца: $V_{\text{км}}$, $V_{\text{тр}}$, $V_{\text{от}}$, $V_{\text{пр}}$, $V_{\text{ох}}$ — соответственно объемы компрессора, трубопровода, разделителя полостей, регенератора и охладителя

положения поршня охладителя и уменьшается холодопроизводительность системы.

На производительность системы охлаждения в определяющей степени сказывается правильность выбора размеров компрессора и охладителя с учетом мертвых объемов, не задействованных во время основной работы системы, эффективности регенератора, а также размеров соединительной трубки между компрессором и охладителем. На рис. 4 даны изменения (приведенные к температуре компрессора) рабочего объема полостей компрессорного цилиндра, соединительной трубки, регенератора, теплого и холодного объема охладителя за один цикл работы машины. Приведенные данные даны для частоты 40.5 Гц, среднего давления 15 ата, нагрузки 0.25 Вт. Угол сдвига поршней компрессора и охладителя определяется характеристиками системы. По этому графику можно корректировать конструкцию с точки зрения сокращения объемов мертвых полостей компрессора, соединительной трубки и регенератора, а также изменения режима питания силовых катушек компрессора. При этом необходимо учитывать гидравлическое сопротивление названных элементов машины и стоящие перед

ними задачи теплообмена, соединения частей машины и охлаждения объекта. В частности, может быть существенно уменьшен мертвый объем компрессора, который не используется при данной нагрузке. Значительный объем имеет соединительный трубопровод, но при данной длине его гидравлическое сопротивление не позволяет существенно увеличить проходной диаметр. Может быть уменьшен объем регенератора, диаметр которого был увеличен из-за производственных сложностей изготовления, но здесь нужно учитывать эффективность теплообмена и величину полезной нагрузки. И наконец, холодный объем рабочей полости охладителя — он значителен, но его размер диктуется временем выхода на рабочий режим и полезной нагрузкой. Конечно, он работает в противофазе с компрессором, но это объем, который производит холод, и его нужно совершенствовать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования опытного образца охладителя типа Сплит-Стирлинг подтвердили правильность принятых системных и большинства конструктивных решений. Также были определены пути дальнейшего конструктивного усовершенствования системы охладителя. Так, для уменьшения резонансной частоты компрессора требуется увеличение веса его подвижных элементов, и поэтому рациональным является вопрос о повторном рассмотрении варианта конструкции с подвижными постоянными магнитами и неподвижными катушками. Такие изменения позволят отказаться от разборных фланцев, упростить конструкцию и существенно улучшить весогабаритные характеристики системы. Также такое решение позволит повысить надежность системы. Такое изменение системы требует пересмотра идеологии электропитания силовых катушек системы. Но изменение конструкции не снижает значения процессов, происходящих в самой машине, и их все равно нужно учитывать при новых разработках и эксплуатации существующих систем охлаждения.

1. *Справочник по физико-техническим основам криогеники* / Под ред. М. П. Малкова. — М.: Энергия, 1973. — 392 с.

Стаття надійшла до редакції 19.02.14

*С. О. Засуха, М. І. Лихоліт, О. Л. Макаров,
Ю. О. Меленевський, В. Т. Архипов, В. Е. Шатіхін*

КРІООХОЛОДЖУВАЧ СПЛІТ-СТІРЛІНГ ДЛЯ ФОТОПРИЙМАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Описано дослідний зразок охолоджувача типу Спліт-Стірлінг, розроблений, виготовлений і випробуваний Центром «Кріокосмос» спільно з українськими організаціями КП СП «Арсенал» та ДП КБ «Південне». Наводяться параметри кріоохолоджувача, з яких видно, що його характеристики залежать від резонансних характеристик компресора і охолоджувача, від співвідношення об'ємів порожнин машини, від тиску і частоти роботи машини. Параметри машини залежать також від параметрів напруги живлення (струму), теплового навантаження і температури охолодження об'єкта. Наводяться також особливості підготовки системи до роботи. Дослідження роботи дослідного зразка дозволяють визначити оптимальні шляхи його подальшого вдосконалення. Результати досліджень дадуть можливість споживачам і розробникам подібних охолоджувачів краще розуміти процеси, що протікають у машині.

*S. A. Zasuha, N. I. Lykholit, A. L. Makarov,
Y. A. Melenevskiy, V. T. Arhipov, V. Ye. Shatikhin*

SPLIT-STIRLING CRYOCOOLER FOR PHOTO-RECEPTORS

We describe a prototype of the cooler-type Split-Stirling. The cooler is designed, manufactured and tested by the Centre "Cryocosmos", together with two Ukrainian organizations, namely, State-owned enterprise of a specialized instrumentation "Arsenal" and Design Bureau "Yuzhnoye". The cryocooler parameters are given which show that the cryocooler characteristics depend on the resonance characteristics of the compressor and cooler, on the ratio of void volumes for the machine, on the gas pressure and operation frequency of the machine, and on the parameters and shape of supply voltage (current). The machine parameters are also dependent upon the heat load and cooling temperature of the object. Some features of the system training to operation are considered. The study of the prototype enables one to determine the best way for its further improvement. The research results can give consumers and developers of such coolers a clearer insight into the processes taking place in the cooler.