

БОРТОВЫЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ УСТАНОВКИ*Некрасова С.О., Довгялло А.И.*

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),
Самара, Российская Федерация

Бортовые криогенные установки малой холодопроизводительности, используемые сегодня для нужд космической техники, представляют собой машины Стирлинга. В России они изготавливаются под конкретную целевую задачу специального назначения и не обладают таким большим ассортиментом, как в экономически развитых странах. Указанный изготовителем ресурс определяется для конкретных условий эксплуатации серийного образца, который очень часто оказывается шадящим, по сравнению с условиями эксплуатации в космосе.

В результате, такая криогенная машина может не обеспечить на борту космического аппарата заявленных характеристик. Существующие на сегодняшний день ГКМ Стирлинга на 80 К имеют заявленный ресурс в 10000 часов, в то время как ресурс их европейский аналогов достигает 40000 часов [1,2]. Более того, эффективных высокоресурсных микрокриогенных установок с температурой криостатирования 20 К, которые уже сегодня необходимы для систем инфракрасного наблюдения, не существует вообще.

Исходя из этого, первой причиной, по которой термоакустические охладители должны вытеснить механические, является их высокий ресурс эксплуатации. Даже по самым скромным оценкам ресурс таких установок превысит 100000 часов.

Несмотря на очевидное преимущество в ресурсе, такая установка в целом обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, использование термоакустического компрессора взамен электрического приведёт к повышению затрат энергии более чем в два раза. Это очень ощутимо в условиях дефицита бортовой электроэнергии.

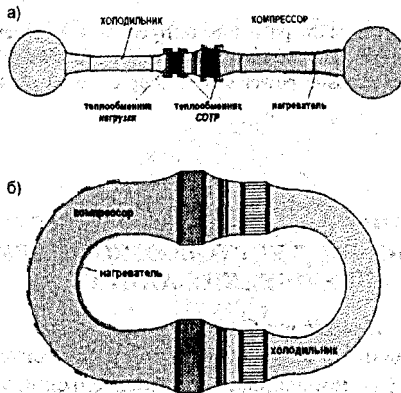
Во-вторых, такая система будет тяжелее, чем механический аналог за счёт присутствия резонаторов. По разным предварительным оценкам, масса такой системы будет выше в 1,2 – 2 раза. Здесь следует отметить, что эта оценка дана для случая использования бортовой электроэнергии, которая в свою очередь получена с коэффициентом преобразования порядка 20%.

Одним из способов преодоления энергетической проблемы для нагрева горячего теплообменника является не электронагрев, а непосредственно солнечное излучение (концентратор лучистой энергии) или радиоизотопный источник тепла.

В этом случае исключается энергетическая цепочка получения части электроэнергии в системе электропитания космического аппарата, которая обеспечивает функционирование криогенной системы. То есть, если для термоакустического криоохладителя использовать электропривод (пусть это будет самый совершенный Стирлинг с пульсационным охладителем), то для потребной холодопроизводительности в 1 Вт на уровне 80 К необходимо 30 Вт электрической мощности. Эти 30 Вт производятся бортовой энергосистемой (фотоэлек-

трические преобразователи, термоэлектрические или термоэмиссионные преобразователи с ядерным или радиоизотопным источником тепла) с коэффициентом преобразования 20% из 150 Вт подведенного тепла. Таким образом, для получения 1 Вт холода на уровне 80 К необходимо 150 Вт подведенного тепла.

Рассмотрим термоакустический криоохладитель с генерацией пульсаций в термоакустическом контуре прямого цикла, например, холодильник Хофлера (рис.1). Назовем его – «теплоиспользующий термоакустический охладитель». Пусть необходимая холодопроизводительность $Q_x = 1$ Вт на уровне $T_x = 80$ К генерируется в холодном контуре с коэффициентом преобразования (холодильный коэффициент $\varepsilon = \frac{Q_x}{W} = 25\%$ от цикла Карно). Тогда при холодильном коэффициенте по Карно $\varepsilon_c = \frac{T_x}{T_{гх} - T_x} = \frac{80}{350 - 80} = 0.3$ эффективный холодильный коэффициент будет равен 0.075, что означает, что для получения 1 Вт холода потребуется 13 Вт эффективной акустической мощности (здесь Q_x - потребная холодопроизводительность, W - эффективная акустическая мощность, T_x - температура криостатирования, $T_{гх}$ - температура «горячего» теплообменника холодного контура).



а) система на основе пульсационных труб,
 б) система с волной, циркулирующей по тороидальному резонатору
 Рисунок 1 – Варианты исполнения холодильника Хофлера [3],
 не содержащего подвижных частей

Если использовать внешнее тепло непосредственно в контуре прямого цикла с коэффициентом преобразования тепла в акустическую энергию волны в 20 % (это внутренний к.п.д. ТАП прямого цикла), то для получения эффективной акустической мощности $W = 13$ Вт потребуется (предположительно, с запасом в два раза) $W = 26$ Вт индикаторной мощности (волновой энергии). Эта мощность $W = 26$ Вт генерируется в контуре прямого цикла с к.п.д. 20 %, что соответствует потребному подведенному к горячему теплообменнику теплу $Q_{г} = 130$ Вт.

Таким образом, предварительная оценка эффективности получения холода на уровне температуры криостатирования 80 К в теплоиспользующем термоакустическом охладителе даст весьма оптимистические прогнозы.

Ещё одной важной особенностью теплоиспользующего термоакустического охладителя является наличие четырех температурных уровней, а не трех, как в поршневой теплоиспользующей машине Такониса. То есть "горячий" теплообменник сброса тепла холодного контура может иметь иную температуру, чем холодный теплообменник сброса тепла горячего контура.

Это позволяет работать последнему на более высоких уровнях температуры, что в свою очередь существенно уменьшает массу и габариты радиатора-излучателя, обслуживающего этот контур. Это компенсирует некоторую объективную "громоздкость" термоакустического преобразователя.

Создание криогенных бортовых систем с температурным уровнем 20-40 К и приемлемым ресурсом представляется возможным при условии использования двухступенчатых термоакустических охладителей.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Qiu, L.M. Chen Investigation on a thermoacoustically driven pulse tube cooler working at 80 K / L.M. Qiu, D.M. Sun, W.L. Yan, P. Chen, Z.H. Gan, X.J. Zhang, G.B. // Cryogenics 45. – 2005. – P. 380-385.

2. Radebaugh, R. Development of the pulse tube refrigerator as an efficient and reliable cryocooler. – London: Proc. Inst. Refrigeration 2000. – P. 11-29.

3. Hofler, T.J. Heat driven acoustic power source coupled to an electric generator, US Patent № 5,647,217. – 1997.

УДК 621.486

ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ В БОРТОВЫХ КОМПЛЕКСАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Некрасова С.О., Довгялло А.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика
С.П. Королева (национальный исследовательский университет)
Самара, Российская Федерация

Одной из главных тенденций развития ракетно-космической отрасли является повышение удельных показателей, увеличение ресурса и срока службы космических аппаратов при одновременном снижении их массогабаритных показателей. Перспективным направлением здесь является разработка и внедрение энергетических установок на основе термоакустических двигателей для электропитания космических аппаратов. Термоакустические двигатели имеют множество преимуществ. Во-первых, в данных устройствах может реализовываться внешний подвод тепла, например, от поступающего солнечного излучения или радиоизотопных источников. Во-вторых, данные устройства не содержат каких-либо движущихся частей, за исключением подключенных нагрузок (линейных электрических генераторов). В-третьих, они имеют достаточно высокую