

водородном топливе // Вестник СГАУ, 2014. Вып. 5 (47). Ч. 4. С.149-155.

3. Салич В.Л. Численное исследование рабочего процесса в камере ракетного двигателя малой тяги на кислородно-водородном

топливе // Вычислительные методы и программирование. – М.: Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ им. М.В. Ломоносова. 2015. Т. 16. С. 187-195

УДК 621.486

КРИОГЕННЫЙ ОХЛАДИТЕЛЬ НА ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТРУБЕ С ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

©2016 С.О. Некрасова, В.Н. Белозерцев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

PULSE TUBE CRYOCOOLER DRIVEN BY THERMOACOUSTIC HEAT ENGINE

Nekrasova S.O., Belozertsev V.N. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

In this paper, a 77 Hz pulse tube cryocooler (PTC) driven by a thermoacoustic heat engine (THE) has been studied. A double-acting thermoacoustic heat engine incorporates a hot heat exchanger, a regenerator, a cold heat exchanger and an acoustic feedback. Compared with the conventional thermoacoustic heat engine which involves a travelling-wave loop and a resonator, it has advantages of compact size and potentially high thermal efficiency. In this paper, a THE-PTC system has been studied generally. Firstly, the numerical simulation has been conducted to design the system and so optimum structure parameters of the system were obtained. With the operating condition of 3.3 MPa for mean pressure and 50 Hz as a working frequency, a cooling power of 8 W at 77 K and a relative Carnot efficiency of 11.75% has been achieved.

Криогенный охладитель на пульсационной трубе с использованием в качестве привода термоакустического двигателя не имеет в составе конструкции движущихся компонентов за исключением осциллирующего движения рабочего газа. Это исключает у таких систем наличие вибраций, ограниченного ресурса и других недостатков, связанных с компрессорной частью. Кроме того, возможность использования солнечной энергии в качестве источника подводимого тепла в термоакустическом двигателе (ТАД) делает весьма привлекательной технологию использования его в качестве привода холодильной машины в условиях космоса. Холодильники на пульсационной трубе (ХПТ) не имеют поршня-вытеснителя, работающего при криогенном уровне температур, что является одной из основных преимуществ конструкции, обеспечивающих внимание к данному типу охладителей широкого круга исследователей. Комбинирование ХПТ и ТАД позволило бы получить криогенный уровень охлаждения, исключая нежелательные для длительного ресурса работы явления, снизить стоимость, повысить эффективность за счёт снижения потерь на преобразование энергии.

Первое затруднение в комбинировании двух устройств состоит в том, что термоакустические двигатели имеют ограничения по максимальной амплитуде давления, приводя к нелинейным акустическим процессам и снижению эффективности. В случае ХПТ высокая амплитуда давления, напротив, приводит к уменьшению габаритов конструкции. Вторым фактором, затрудняющим комбинирование двух систем, является разница диапазонов рабочих частот ТАД и ХПТ. Термоакустические двигатели на стоячей волне с эффективностью по Карно до 40 % находятся в диапазоне 60-80 Гц, в то время как рабочая частота ХПТ может достигать 300 Гц для уровня температуры охлаждения 70-80 К.

Несмотря на перечисленные ограничения, имеется широкий ряд публикаций по охладителям с уровнями охлаждения 77 К [1] в качестве привода которого использовался термоакустический двигатель на стоячей волне, а также ХПТ с уровнем охлаждения 80.9 К, где в качестве драйвера использовался двигатель на бегущей волне [2].

Фазирование гармонических законов изменения акустического давления и объёмной скорости для термоакустического двига-

теля имеет важное значение для осуществления термодинамического цикла в регенераторе, сходного с высокоэффективным циклом Стирлинга, и эффективности преобразования тепловой энергии в акустическую в ТАД. Таким образом, для достижения высокой эффективности при комбинировании ТАД и ХПТ необходимо, чтобы в обеих системах осуществлялось синфазное изменение давления и объёмной скорости, соответствующее фазированию бегущей волны.

Для реализации этого условия необходимо, чтобы в охладителе на пульсационной трубе фазовое отличие законов распределения акустического давления и объёмной скорости потока составляло не более 90 градусов. Это трудно достижимо для участка с "горячим" концом пульсационной трубы, поскольку её влияние на распределение параметров аналогично податливости. Кроме того, наличие дросселя также меняет фазу параметров давления и скорости. Условие синфазности распределения давления и акустической скорости выполняется для конструкции охладителя с пульсационной трубой при наличии инерционности в виде длинной трубки малого диаметра, которая обычно соединена с буферной полостью. Согласно работе [3] правильное соотношение фаз давления и объёмной скорости достижимо в конструкции охладителя с пульсационной трубой без буферной полости и с инерционной трубой, имеющей один закрытый конец.

Рассмотрим в качестве привода охладителя на пульсационной трубе термоакустический двигатель на бегущей волне, который состоит из теплового узла, расположенного коаксиально относительно буферной трубки, и обратной акустической связи. Разработанная модель термоакустического двигателя на бегущей волне в DeltaEC демонстрирует сравнительно узкий диапазон вариации параметров рабочего режима: давление заправки 3...3,35 МПа, рабочая частота 50...54 Гц, амплитуда давления при этом составляет около 10% от давления заправки, максимальная температура материала горячего теплообменника 743 К. Наибольшая генерируемая акустическая мощность при этом составила 320 Вт при эффективном КПД термоакустического двигателя 24 %.

При проектировании холодильника с пульсационной трубой пусть необходимая холодопроизводительность $Q_x=8$ Вт на уровне $T_x=77$ К генерируется в холодном контуре с коэффициентом преобразования (холодильный коэффициент $\varepsilon = Q_x / W_{ac} = 8/300 = 27\%$ от цикла Карно. Тогда при холодильном коэффициенте по Карно $\varepsilon_{Carnot} = T_x / T_{cx} - T_x = 77 / (300 - 77) = 0,35$ эффективный холодильный коэффициент будет равен 0,095, что означает, что для получения 1 Вт холода потребуется 10,5 Вт эффективной акустической мощности (здесь Q_x - потребная холодопроизводительность, W_{ac} - эффективная акустическая мощность, T_x - температура криостатирования, $T_{гх}$ - температура горячего теплообменника холодного контура).

Если использовать при комбинировании ТАД с ХПТ внешнее тепло непосредственно в контуре прямого цикла с полученным значением коэффициента преобразования тепла в акустическую энергию волны 24 % (это внутренний к.п.д. ТАП прямого цикла), то для получения эффективной акустической мощности $W_{ac} = 10.5$ Вт потребуется (предположительно, с запасом) $W_{acwave} = 24$ Вт индикаторной мощности (волновой энергии). Эта мощность генерируется в контуре прямого цикла с к.п.д. 24 % , что соответствует потребному подведенному к горячему теплообменнику теплу $Q_{г} = 100$ Вт. Таким образом, предварительная оценка эффективности получения холода на уровне температуры криостатирования 77 К в теплоиспользующем термоакустическом охладителе даёт весьма оптимистические прогнозы.

Биографический список

1. Jinyuan Xu et al. Numerical Investigation on a 300 Hz Pulse Tube Cryocooler Driven by a Double-acting Thermoacoustic Heat Engine // Energy Procedia 75, 2015. P. 1484 – 1489.
2. Dai W., Luo E., Hu J., Chen Y. A novel coupling configuration for thermoacoustically driven pulse tube coolers: acoustic amplifier. Chin SciBull 2005. 50:2113–5.
3. Hu J.Y., Luo E.C., Dai W., An efficient and low coupling method for heat driven thermoacoustic cryocooler,” Journal of Applied Physics. 2006. Submitted.