

РАСЧЁТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ПУЛЬСАЦИОННОГО ОХЛАДИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Довгялло А.И.¹, Благин Е.В.¹, Лукашева М.В.², Некрасова С.О.¹,
Угланов Д.А.¹

- 1) Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С.П. Королёва (научно-исследовательский университет),
Самара, Российская Федерация;
- 2) РКЦ «Прогресс», Самара, Российская Федерация

Охладители на основе пульсационной трубы (рис.1) как развитие холодильных машин Гиффорда-Макмагона были представлены впервые в середине 60-х годов Гиффордом и Лонгсуортом [1]. Развитие теории пульсационных преобразователей до области термоакустического взаимодействия полей давления и скорости позволило получить необходимое фазирование данных параметров по времени. Пульсационные системы на основе стоячей волны в настоящее время стали классифицировать как термоакустические охладители [2].

Если в ГKM (Стирлинга, Гиффорда, Вьюлюме) перемещение рабочего тела осуществляется как минимум двумя поршнями, то в пульсационном охладителе роль поршня-вытеснителя выполняет пульсационная труба с вспомогательным теплообменником, жиклером и резервуаром (буферной полостью) (рис.1).

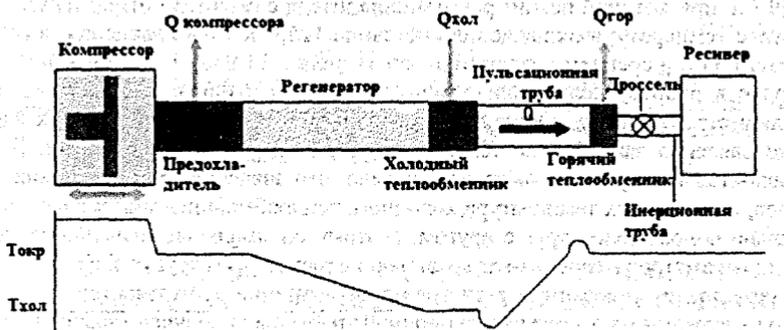


Рисунок 1 – Схема холодильника на основе пульсационной трубы

К энергетическим достоинствам акустических машин следует отнести тот факт, что рабочий газ в процессе цикла совершает перемещение на глубину акустического смещения, в то время как в холодильнике Стирлинга он перемещается через весь регенератор и теплообменники. Кроме того, термоакустические охладители на основе пульсационной трубы обладают меньшим количеством подвижных механических частей или не имеют таковых вообще. Это существенно повышает ресурс системы, а также снижает их стоимость.

Для разработки расчетной модели охладителя на основе пульсационной трубы был использован программный комплекс DeltaEC (Design Environment for Low-amplitude ThermoAcoustic Energy Conversion – разработка Los Alamos National Laboratory, версия - 6.3b11, свободная лицензия), предназначенный для моделирования акустических устройств и описания термоакустических процессов в них и являющийся основным средством получения их конструктивных параметров.

Для разработки расчетной модели охладителя на основе пульсационной трубы за основу взята конструкция холодильной установки, представленной в работе [3] (рис.2).

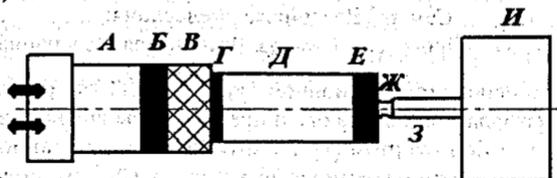


Рисунок 2 – Принципиальная схема пульсационного охладителя с разбиением на расчетные сегменты по функциональным признакам

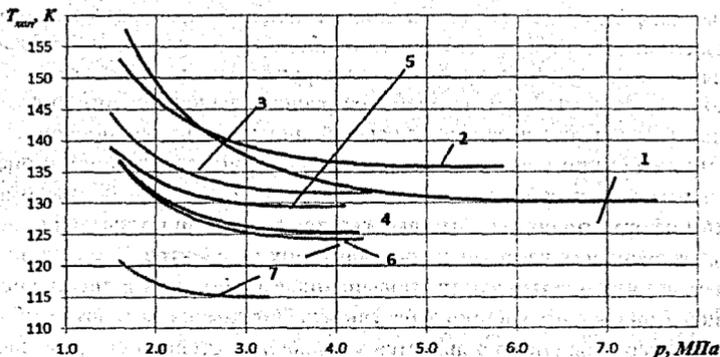
Начальные параметры для расчетной модели – давление, частота осцилляций, объемная скорость потока - выбирались, исходя из того, что подвод акустической энергии в устройство осуществляется при помощи линейного пульсатора давления STAR фирмы «QDrive».

Для исследования модели получена резонансная частота работы охладителя $f = 59$ Гц, при которой режим работы охладителя считается оптимальным, в результате температура охлаждения составила 125,6 К (для сравнения; в [8] при частоте 65 Гц и среднем давлении рабочего тела 1,8 МПа, $T_{хол} = 125,74$ К).

Далее в работе исследовалось влияние конструктивных параметров, таких как диаметры теплообменников, пульсационной и инерционной труб, их длин, а также давления заправки на температуру в холодном теплообменнике. В ходе предварительного расчета было обнаружено, что значения геометрических параметров, при которых температура холодного теплообменника минимальна, незначительно коррелируют друг с другом, поэтому оптимальные значения геометрических параметров можно считать условно независимыми друг от друга.

В результате проведенных расчетов по оптимизации прототипа термоакустического охладителя на основе пульсационной трубы было получено значение температуры охлаждения, равное 115 К. Оптимизация проводилась по проходным сечениям передающей трубы, входного теплообменника, регенератора, горячего и холодного теплообменников и пульсационной трубы, а также по длине: регенератора, пульсационной и инерционной труб и по среднему давлению в цикле.

На первом этапе был найден оптимальный диаметр передающей трубы А, входного теплообменника Б и регенератора В, затем, исходя из полученных данных, была проведена оптимизация диаметров холодного Г и горячего Е теплообменников и пульсационной трубы Д. Для каждого этапа оптимизации было рассчитано оптимальное давление на входе, позволяющее получить наименьшую температуру холодного теплообменника.



1 – исходная модель; 2 – оптимизация по R_{A-B} ; 3 – оптимизация по R_{A-E} ;
 4 – оптимизация по $R_{A-Ж}$; 5 – оптимизация по $R_{A-Ж}, L_B$;
 6 – оптимизация по $R_{A-Ж}, L_B, L_D$; 7 – оптимизация по $R_{A-Ж}, L_B, L_D, L_Ж$
 Рисунок 3 – Зависимость $T_{кон}$ от среднего давления в цикле для всех этапов расчета оптимизации модели

В результате оптимизации модель установки будет иметь следующие конструктивные параметры (табл.5). Расчетное значение эффективного холодильного коэффициента ϵ как отношение холодопроизводительности Q_C к подводимой к альтернатору электроэнергии $W_{эл}$ для пульсационного охладителя составило 3 % ($Q_C = 4 \text{ Вт}$, и $W_{эл} = 120 \text{ Вт}$).

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Gifford, W.E. and Longworth, R.C., Pulse tube refrigeration, Trans. of the ASME, Journal of Engineering for Industry, paper No. 63-WA-290, August 1964.
2. Swift, G.W. Thermoacoustic engines, J. Acoust. Soc. Am., 84, 1145-1180 (1988).
3. Farouk, B., Dion, A. Experimental and numerical investigations of cryogenic pulse tube refrigerators // VIII Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources". Minsk, Belarus, September 12-15, 2011.

УДК 620.004.5

КЕПСТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Парфиевич А.Н., Драган А.В.

Брестский государственный технический университет,

Брест, Республика Беларусь

Введение. Для определения технического состояния исследуемых объектов акустическая диагностика использует информацию, содержащуюся в акустическом сигнале и включающую не только акустическое поле объекта, но и другие колебательные процессы, сопровождающие его функционирование. При исследовании широко используется информация, содержащаяся в колебательных процессах узлов и отдельных деталей машины, распределение колебательных процессов в рабочих средах работающих узлов и т.п. Акустический подход, ос-