

УДК 628.517

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА

© 2011 А. А. Харитонов

Государственный научно-производственный ракетно-космический центр  
«ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Представлен анализ переходных процессов в термоакустическом тепловом насосе, разработанном ООО «Термоакустические технологии» совместно с ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс». Экспериментальная термоакустическая установка может использоваться в качестве холодильника, теплового насоса или акустического пульсатора. Она состоит из термоакустического двигателя, термоакустического холодильника и акустического резонатора. Работа экспериментальной установки основана на прямом и обратном термоакустических эффектах. Прямой термоакустический эффект - это генерация акустических волн из-за градиента температуры. Обратный термоакустический эффект - это генерация градиента температуры из-за работы акустических волн. Термоакустическая технология имеет множество различных применений в различных отраслях науки и техники.

*Термоакустика, тепловой насос, холодильник, резонатор, акустические волны.*

Обозначения:

- |   |  |
|---|--|
| $q_1$ - мощность нагрева термоакустического двигателя,                                    | $T_1$ - температура горячего теплообменника термоакустического двигателя,                                  |
| $q_2$ - холодопроизводительность термоакустического холодильника,                         | $T_2$ - температура холодного теплообменника термоакустического холодильника,                              |
| $q_1^*$ - приведенная мощность нагрева термоакустического двигателя,                      | $t_0$ - длительность цикла,  |
| $q_2^*$ - приведенная холодопроизводительность термоакустического холодильника,           | $\tau$ - безразмерное время,   |
| $q_{10}$ - приведенная мощность холодного теплообменника термоакустического двигателя,    | $Q_1$ - безразмерная мощность нагрева термоакустического двигателя,  |
| $q_{20}$ - приведенная мощность холодного теплообменника термоакустического холодильника, | $Q_2$ - безразмерная холодопроизводительность термоакустического холодильника,                             |
| $W_1$ - выходная акустическая мощность термоакустического двигателя,                      | $H_1$ - безразмерный коэффициент теплоотдачи термоакустического двигателя,                                 |
| $W_2$ - подведенная к термоакустическому холодильнику акустическая мощность,              | $H_2$ - безразмерный коэффициент теплоотдачи термоакустического холодильника,                              |
| $\eta_{12}$ - акустический КПД волновода-резонатора,                                      | $\theta_1 = T_1 / T_0$ - безразмерная температура горячего теплообменника термоакустического двигателя,    |
| $c_1$ - приведенная теплоемкость термоакустического двигателя,                            | $\theta_2 = T_2 / T_0$ - безразмерная температура горячего теплообменника термоакустического холодильника. |
| $c_2$ - приведенная теплоемкость термоакустического холодильника,                         |  |
| $h_1$ - коэффициент теплоотдачи термоакустического двигателя,                             |  |
| $h_2$ - коэффициент теплоотдачи термоакустического холодильника,                          |  |
| $m_1$ - эффективная масса термоакустического двигателя,                                   |  |
| $m_2$ - эффективная масса термоакустического холодильника,                                |  |
| $T_0$ - температура охлаждающей жидкости,   |  |

Работа термоакустических устройств опирается на хорошо известные классические положения термодинамики. Тепловой термоакустический двигатель производит механическую работу по генерации акустических волн за счет потока тепла от тела с высокой температурой к телу с низкой температурой. Термоакустический холодильник приводится в действие акустическими волнами и вызывает поток тепла от тела с низкой температурой к телу с высокой температурой. Термоакустическая технология основана на прямом и обратном термоакустиче-

ском эффектах. Прямой термоакустический эффект состоит в возникновении акустических волн в резонаторе под действием градиента температур. Обратный эффект, на котором основана работа холодильника, состоит в возникновении градиента температур под действием акустических волн.

Область эффективного применения термоакустических технологий весьма широка и включает следующие основные направления (представлен далеко не полный перечень):

- энергоустановки для космических аппаратов;
- сжижение природного и попутного газов;
- тепловые насосы для обогрева и охлаждения зданий;
- разделение газовых смесей и изотопов;
- охлаждение сверхпроводников;
- охлаждение радаров;
- сжижение воздуха;
- промышленные и бытовые холодильники;
- автомобильные кондиционеры, работающие за счет тепла выхлопных газов двигателя;
- криохирurgia;
- охлаждение сверхпроводящих магнитов для систем ЯРМ;
- охлаждение СКВИД-магнитометров.

Преимущества термоакустических устройств:

- возможность замены широкого класса механических устройств на волновые;
- отсутствие подвижных механических частей снимает проблемы износа, усталости, загрязнения смазкой и т. д.;

- надежность и большой ресурс;
- простота конструкции;
- низкая стоимость.

Разработана экспериментальная термоакустическая установка, состоящая из термоакустического двигателя, акустического резонатора и термоакустического холодильника. Установка может работать в режимах теплового насоса, холодильника или акустического пульсатора. Рабочим телом установки является сжатый гелий.

В тороидальном термоакустическом двигателе под действием прямого термоакустического эффекта за счет создаваемого электронагревателем и водоохлаждаемым теплообменником градиента температур возникают бегущие акустические волны. Термоакустический холодильник также имеет тороидальную конструкцию. В нем акустические волны создают градиент температур, который в соответствии с обратным термоакустическим эффектом приводит к охлаждению рабочего теплообменника. Как термоакустический двигатель, так и термоакустический холодильник соединены с четвертьволновым акустическим резонатором на стоячих волнах, который выполнен из отрезков труб увеличивающегося диаметра, соединенных протяженным конусом с углом раствора 7 градусов.

Термодинамическая схема установки в режиме термоакустического холодильника представлена на рис. 1.

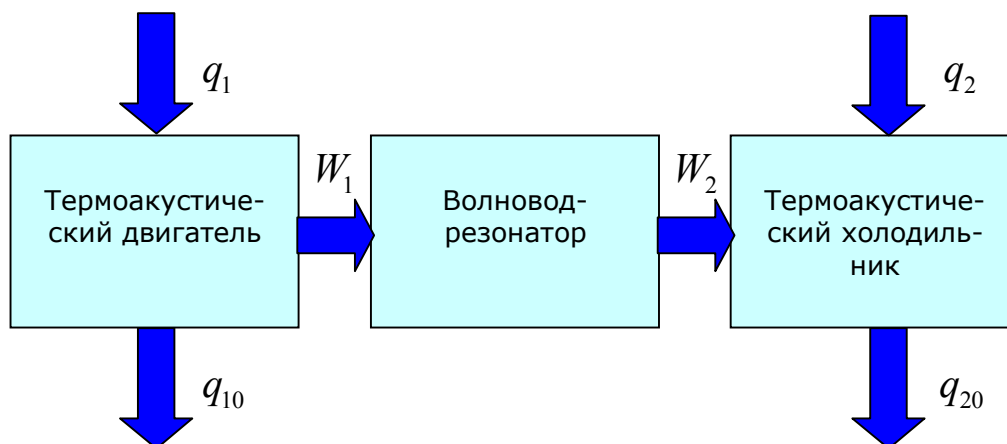


Рис. 1. Термодинамическая схема установки

В соответствии с первым законом термодинамики в установившемся режиме имеем

$$\begin{aligned} W_1 &= q_1 - q_{10}, \\ q_2 &= q_{20} - W_2, \end{aligned}$$

где  $W_2 = \eta_{12}W_1$ .

Переходные процессы в термоакустическом двигателе и холодильнике описываются следующими дифференциальными уравнениями:

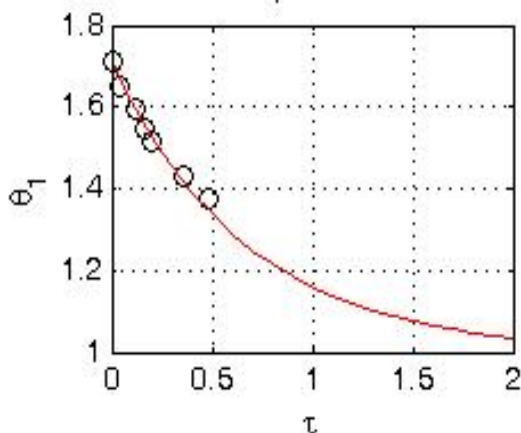
$$\begin{aligned} c_1 m_1 \frac{dT_1}{dt} &= q_1^* - h_1 (T_1 - T_0), \\ c_2 m_2 \frac{dT_2}{dt} &= -q_2^* + h_2 (T_0 - T_2). \end{aligned} \quad (1)$$

Переход к безразмерным переменным дает уравнения переходных процессов в виде

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1}{d\tau} &= Q_1 - H_1(\theta_1 - 1), \\ \frac{d\theta_2}{d\tau} &= -Q_2 + H_2(1 - \theta_2), \end{aligned}$$

где безразмерная мощность нагрева и холодопроизводительность имеют вид

$$H_1 = 1.5$$



$$Q_1 = \frac{t_0}{c_1 m_1 T_0} q_1^*,$$

$$Q_2 = \frac{t_0}{c_2 m_2 T_0} q_2^*.$$

Безразмерные коэффициенты теплоотдачи равны

$$H_1 = \frac{t_0}{c_1 m_1} h_1,$$

$$H_2 = \frac{t_0}{c_2 m_2} h_2.$$

Идентификация коэффициентов теплоотдачи выполнена на основе измерения температур двигателя и холодильника при выключении устройства, когда они стремятся к температуре среды, т.е. единичной безразмерной температуре. На рис. 2 представлены результаты измерений температур (кружки) и численного решения дифференциальных уравнений (1) при  $Q_1 = 0$ ,  $Q_2 = 0$ .

$$H_2 = 1$$

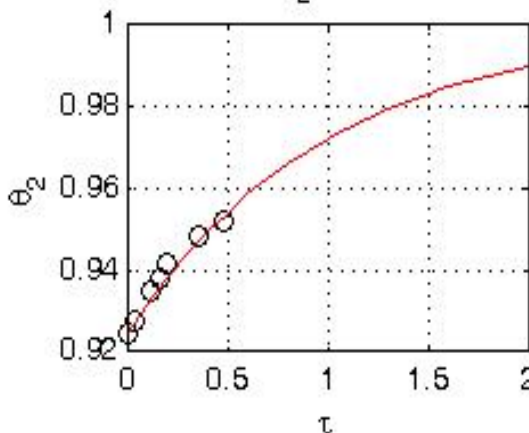


Рис.2. Идентификация безразмерных коэффициентов теплоотдачи

Значения коэффициентов безразмерных теплоотдачи  $H_1 = 1.5$ ,  $H_2 = 1.0$  обеспечивают наименьшее отклонение расчетных данных от экспериментальных.

Идентификация безразмерных мощности нагрева и холодопроизводительности выполнена на основе измерения температур двигателя и холодильника при включении устройства. На рис. 3 представлены результаты измерений температур (кружки) и численного решения дифференциальных уравнений (1) при найденных ранее коэффициентах теплоотдачи. Значения безразмерных

мощности нагрева и холодопроизводительности  $Q_1 = 1.16$ ,  $Q_2 = 0.11$  обеспечивают наименьшее отклонение расчетных данных от экспериментальных.

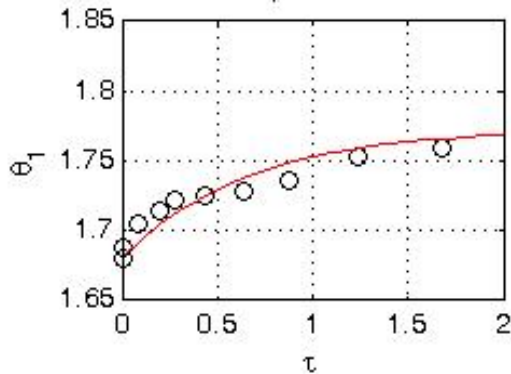
Управление устройством сводится к регулированию мощности нагрева термоакустического двигателя. Зависимость повышения температуры двигателя  $\Delta\theta_1 = \theta_1 - 1$  от подводимой мощности  $Q_1$  описывается уравнением

$$\frac{d\Delta\theta_1}{d\tau} + H_1 \Delta\theta_1 = Q_1.$$

Передаточная функция повышения безразмерной температуры термоакустического двигателя имеет вид

$$F(s) = \frac{1}{1.5 + s}$$

$$Q_1 = 1.16$$



Безразмерные АЧХ и ФЧХ повышения безразмерной температуры термоакустического двигателя представлены на рис. 4.

$$Q_2 = 0.11$$

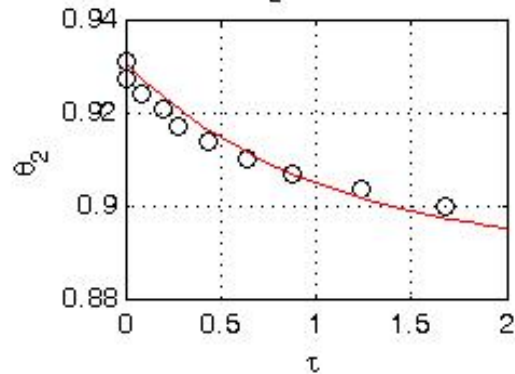


Рис.3. Идентификация безразмерных мощности нагрева и холодопроизводительности

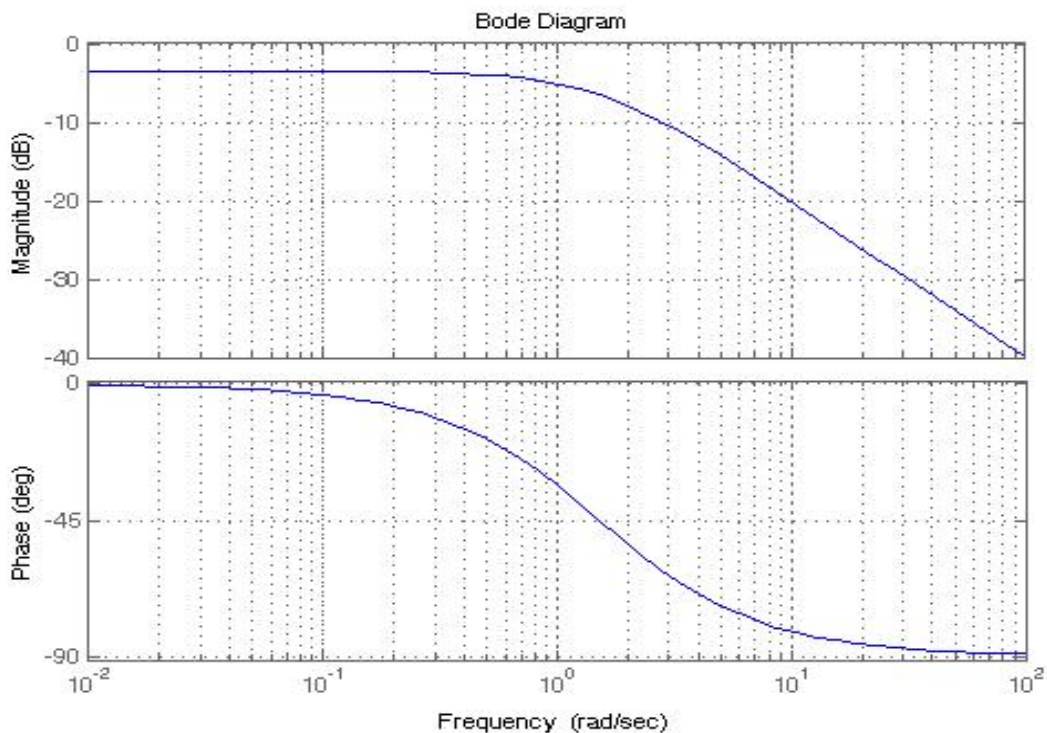


Рис.4. АЧХ и ФЧХ повышения температуры термоакустического двигателя

Представленный в работе метод анализа термоакустических систем может быть использован как при оценке эффективности существующих, так и при проектировании новых термоакустических установок.

**Библиографический список**

1. Андриевский, Б.Р. Элементы математического моделирования в программных

средах MATLAB и Scilab [Текст] / Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков - СПб.: Наука, 2001.

2. Андреев, Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами [Текст] / Ю.Н. Андреев - М.: Наука, 1976.

## THE EXPERIMENTAL THERMOACOUSTIC DEVICE

© 2011 A. A. Kharitonov

Federal State Unitary Enterprise State Research and Production Space Rocket Center  
"TsSKB-Progress"

The transition processes in the thermoacoustic heat pump are presented. The thermoacoustic heat pump was designed and build by "Thermoacoustic Technology Ltd" in cooperation with the ФГУП ГИИ РКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС». The experimental thermoacoustic device may be used as a refrigerator, heat pump or an acoustic pulsator. It consists of the thermoacoustic engine, thermoacoustic refrigerator and the acoustic resonator. The work of the experimental device based on the direct and the reverse thermoacoustic effects. The direct thermoacoustic effect is the generation of the acoustic waves due the temperature gradient. The reverse thermoacoustic effect is the generation of the temperature gradient due the work of the acoustic waves. The thermoacoustic technology has many various applications at different branches of the science and technique.

*Thermoacoustic, heat pump, refrigerator, resonator, acoustic waves.*

### Информация об авторах

**Харитонов Александр Александрович**, начальник сектора Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Тел.: 8-917-950-25-34. E-mail: [haritonov.aleksandr2011@yandex.ru](mailto:haritonov.aleksandr2011@yandex.ru). Область научных интересов: термоакустика.

**Kharitonov Alexander Alexandrovich**, Head Office of Federal State Unitary Enterprise State Research and Production Space Rocket Center "TsSKB-Progress". Phone: 8-917-950-25-34. E-mail: [haritonov.aleksandr2011@yandex.ru](mailto:haritonov.aleksandr2011@yandex.ru). Area of research: thermoacoustic.