

УДК 621.486

Границы термоакустической неустойчивости в термоакустическом двигателе с криогенным охлаждением

Канд. техн. наук Е. А. ЗИНОВЬЕВ¹, канд. техн. наук Г. В. ВОРОТНИКОВ,
д-р техн. наук А. И. ДОВГЯЛЛО, канд. техн. наук С. О. НЕКРАСОВА

¹eazinovyev@gmail.com

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева
(Самарский университет)

Представлены результаты исследования процесса возбуждения акустических колебаний (возникновения термоакустической неустойчивости) в термоакустическом двигателе на бегущей волне, в котором температура теплообменника-нагревателя поддерживается на уровне 300 К, а температура теплообменника-охладителя находится на криогенном температурном уровне. Описана математическая модель, которая позволяет определять границы термоакустической неустойчивости в термоакустическом двигателе с учетом его геометрических и теплофизических характеристик, а также используемого рабочего тела. Полученные результаты могут быть использованы при создании низкотемпературных термоакустических двигателей для преобразования теплоты в акустические колебания, которые впоследствии можно будет использовать в различных практических приложениях, например, для генерации электрической энергии и снижения затрат на регазификацию криогенных продуктов.

Ключевые слова: термоакустический двигатель, границы термоакустической неустойчивости, акустические колебания, математическая модель, криогенное охлаждение, регазификация.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 22.09.2020, принята к печати 08.10.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-20-26

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Зиновьев Е. А., Воротников Г. В., Довгялло А. И., Некрасова С. О. Границы термоакустической неустойчивости в термоакустическом двигателе с криогенным охлаждением // Вестник Международной академии холода. 2020. № 4. С. 20–26. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-20-26

Boundaries of thermoacoustic instability in the thermoacoustic engine with cryogenic cooling

Ph. D. E. A. ZINOVIEV¹, Ph. D. G. V. VOROTNIKOV,

D. Sc. A. I. DOVGIALLO, Ph. D. S. O. NEKRASOVA

¹eazinovyev@gmail.com

Samara National Research University (Samara University)

The article presents the research results of acoustic oscillations excitation (occurrence of thermoacoustic instability) in the traveling-wave thermoacoustic engine, in which the temperature of the heat exchanger-heater is maintained at 300 K, and the temperature of the heat exchanger-cooler is at the cryogenic temperature level. The mathematical model is described that allows to determine the boundaries of occurrence of thermoacoustic instability in the thermoacoustic engine, taking into account its geometric and thermophysical characteristics, as well as the working fluid used. The results obtained can be used to create low-temperature thermoacoustic engines for converting heat into acoustic oscillations, which can be used in various practical applications, for example, for generating electrical energy and reducing the cost of regasification of cryogenic products.

Keywords: thermoacoustic engine, boundaries of thermoacoustic instability, acoustic vibrations, mathematical model, cryogenic cooling, regasification.

Article info:

Received 22/09/2020, accepted 08/10/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-20-26

Article in Russian

For citation:

Zinoviev E. A., Vorotnikov G. V., Dovgyallo A. I., Nekrasova S. O. Boundaries of thermoacoustic instability in the thermoacoustic engine with cryogenic cooling. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020. No 4. p. 20–26. DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-4-20-26

Введение

В последнее время в различных отраслях экономики наблюдается устойчивый рост объемов потребления различных криопродуктов, в том числе сжиженного природного газа (СПГ). Однако их использование возможно только после процесса регазификации, который требует больших затрат энергии (приблизительно 750 кДж/кг для СПГ). Многие технологии регазификации являются не совершенными, поскольку в них не используется такой энергетический потенциал криопродукта как теплоотводящая способность. Если использовать теплоотводящую способность регазифицируемого продукта для отвода тепла цикла тепловой машины, то можно получить полезную работу и вернуть часть энергии, затраченной на регазификацию криопродукта, существенно повысив рентабельность.

Перспективным направлением в задаче повышения эффективности регазификации криопродуктов может быть использование технологических схем на основе термоакустических двигателей. Эти устройства представляют собой принципиально новый тип тепловых двигателей, в которых подводимая теплота из-за термоакустического эффекта преобразуется в акустические колебания. С помощью электроакустических преобразователей эти колебания можно преобразовать в электрическую энергию, которую в дальнейшем можно использовать, например, восполнить затраты на регазификацию криопродуктов. Первый термоакустический двигатель с линейным генератором переменного тока (термоакустический электрогенератор) был создан Бэххаусом и др. [1] в 2004 г. Он обеспечивал электрическую мощность на уровне 58 Вт с теплоэлектрическим КПД 15 % при температуре нагрева 650 °С. В 2016 году Ванг [2] также создал небольшой термоакустический электрогенератор, способный генерировать 73 Вт электрической мощности. В работах [3]–[5] приведены результаты исследований, проведенных на более крупных термоакустических электрогенераторах. Получаемая электрическая мощность у них достигала нескольких киловатт с эффективностью преобразования теплоты в электрическую энергию до 20%. Анализ приведенных работ показал, что процесс создания термоакустических электрогенераторов был сопряжен с рядом технических проблем. Наиболее трудная из них заключалась в том, что необходимо было обеспечить гарантированное возбуждение акустических колебаний в термоакустическом двигателе для приведения в действие электрического генератора.

Для того, чтобы в термоакустическом двигателе реализовался процесс возбуждения акустических колебаний или запуск необходимо обеспечить соответствующий продольный температурный градиент в его регенераторе. При этом теплоту можно подводить к нему при нормальной температуре (около 293 К), а отводить при криогенных температурах. Так в работах Вонга [6] и Киу [7] приводятся результаты экспериментальных исследований, которые демонстрируют работоспособность термоакустических двигателей с охлаждением от жидкого азота.

Для рационального проектирования любого термоакустического двигателя необходимо четко понимать, при каких условиях должен реализоваться режим запуска и последующий выход на установившийся режим работы

(режим установившихся акустических колебаний). Режим запуска представляет собой переходный процесс из состояния «покоя» в состояние, когда вследствие термоакустического эффекта начинается генерация акустических колебаний. Граница между этими двумя состояниями называется границей термоакустической неустойчивости.

Термоакустические колебания привлекают к себе большое внимание еще со времен Такониса [8], который наблюдал самопроизвольное возникновение акустических колебаний в трубке с гелием при охлаждении одного из ее концов до криогенных температур. Клемент [9] экспериментально показал, что на генерируемые акустические колебания влияют как размеры трубки, так и величина температурного градиента. Теоретическое описание возникновения термоакустической неустойчивости при тепловом возбуждении акустических колебаний в трубах с продольным градиентом температуры было впервые дано Роттом в работах [10, 11]. Полученные им теоретические результаты экспериментально были подтверждены Меркли [12]. Позднее, Язаки были проведены работы [13, 14], посвященные экспериментальным исследованиям границ неустойчивости термоакустических двигателей на стоячей и бегущей волне, работающих на разных температурных уровнях. Однако исследований, посвященных вопросам численного определения границ неустойчивости термоакустических двигателей, до сих пор крайне мало.

Анализ приведенных выше литературных источников позволяет сделать вывод, что исследование параметров условий запуска термоакустических двигателей для понимания физики преобразования теплоты в акустические колебания, несомненно, является актуальной задачей. В перспективе генерируемые акустические колебания можно использовать в различных практических приложениях, например, для генерации электрической энергии и снижения затрат на регазификацию криогенных продуктов.

Термоакустический двигатель

На рис. 1 представлена схема устройства и общий вид термоакустического двигателя [15].

Насадка регенератора представляет собой пакет бронзовых сеток марки БрОФ 6,5–0,4 (ГОСТ 6613–86) с диаметром проволоки $d=0,06$ мм. Объемная пористость насадки ϕ составила 0,686, гидравлический радиус ячейки $r_h=32,8$ мкм.

Рабочим телом в рассматриваемом двигателе является гелий, однако, в качестве него могут также использоваться водород, гелий, аргон, ксенон, воздух и другие газы [16, 17].

Математическая модель

Математическая модель для определения границ термоакустической неустойчивости строится при следующих допущениях: рабочее тело — идеальный газ; акустические колебания носят гармонический характер; продольный градиент температуры реализуется только в регенераторе; продольное распределение температуры в регенераторе линейное; теплообменники не влияют на форму акустической волны.

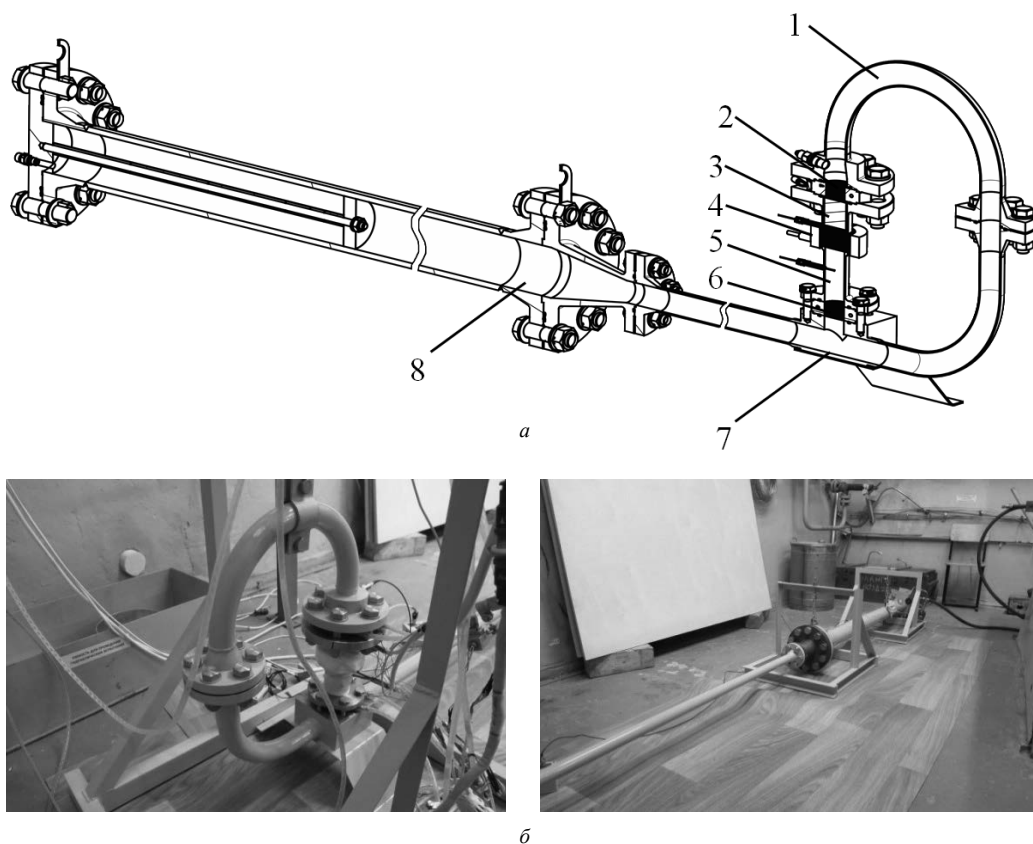


Рис. 1. Схема устройства (а) и общий вид (б) термоакустического двигателя: 1 — инерционная труба; 2 — основной теплообменник-охладитель; 3 — регенератор; 4 — теплообменник-нагреватель; 5 — термическая буферная труба; 6 — дополнительный теплообменник-охладитель; 7 — тройник; 8 — резонатор;

Fig. 1. Scheme (a) and main view (b) of thermoacoustic engine: 1 — inertial tube; 2 — main heat exchanger-cooler; 3 — regenerator; 4 — heat exchanger-heater; 5 — thermal buffer tube; 6 — additional heat exchanger-cooler; 7 — T-socket; 8 — resonator

Термоакустический двигатель рассматривается в качестве акустической цепи, состоящей из компонентов, каждый из которых представляет собой акустический четырехполюсник. Расчетная схема рассматриваемого двигателя приведена на рис. 2.

Каждый четырехполюсник характеризуется матрицей преобразования M , которая формируется с использованием уравнения количества движения и уравнения неразрывности:

$$\frac{dp_1}{dx} = -\frac{i\omega\rho_m U_1}{A_g(1-f_v)}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_1}{dx} = & -\frac{i\omega A_g}{\gamma\rho_m}(1+(\gamma-1)f_k)p_1 + \\ & + \frac{(f_k-f_v)}{(1-f_v)(1-\text{Pr})} \cdot \frac{1}{T_m} \cdot \frac{dT_m}{dx} U_1, \end{aligned} \quad (2)$$

где p_1 — акустическое давление; U_1 — объемная скорость газа; ω — угловая частота акустических колебаний; ρ_m — средняя плотность газа; A_g — площадь проходного сечения канала; γ — показатель адиабаты; Pr — число Прандтля; T_m — средняя температура газа.

Функции f_k и f_v — комплексные функции, определяющие акустические потери в каналах вследствие тепловой релаксации и вязкого трения. Они позволяют описывать процессы в трехмерных каналах с использованием

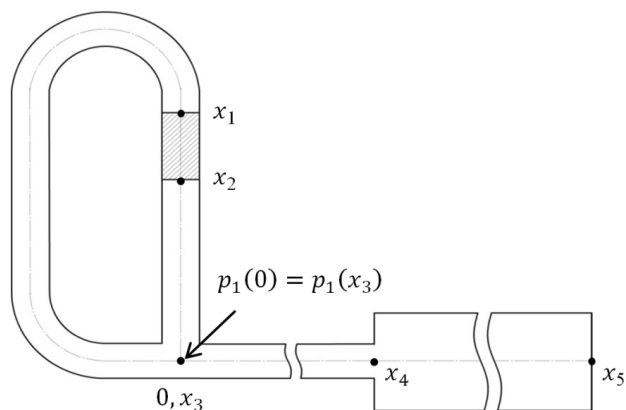


Рис. 2. Расчетная схема

Fig. 2. Design scheme

двух одномерных уравнений. Например, для цилиндрических каналов радиуса r функции f_k и f_v имеют следующий вид [16]:

$$f_{k,v} = \frac{2J_1\left((i-1)\frac{r}{\delta_{k,v}}\right)}{(i-1)\frac{r}{\delta_{k,v}}J_0\left((i-1)\frac{r}{\delta_{k,v}}\right)}, \quad (3)$$

где J_0 и J_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядка, соответственно; δ_k — глубина теплового проникновения, δ_v — глубина вязкого проникновения.

Уравнения (1) и (2) в матричной форме имеют вид

$$\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} p_1(x) \\ U_1(x) \end{pmatrix} = M(x) \begin{pmatrix} p_1(x_0) \\ U_1(x_0) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{i\omega\rho_m}{A_g(1-f_v)} \\ -\frac{i\omega A_g(1+(\gamma-1)f_k)}{\gamma\rho_m} & \frac{(f_k-f_v)}{(1-f_v)(1-\text{Pr})} \cdot \frac{1}{T_m} \cdot \frac{dT_m}{dx} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

Для каналов, в которых средняя температура газа $dT_m/dx=0$, уравнение (4) может быть решено аналитически с условием, что акустические колебания являются гармоническими.

Регенератор представляет собой компонент, в котором продольный градиент температуры $dT_m/dx \neq 0$. В этом случае решить уравнение (4) аналитически крайне сложно, поэтому лучше воспользоваться численными методами, например, методом Рунге-Кутты 4-го порядка. В этом случае регенератор длиной L_{reg} необходимо разбить на n одинаковых сегментов длиной Δx . Матрица преобразования $M(x)$ для каждого такого сегмента будет иметь вид

$$M(x) = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{i\omega\rho_m}{A_g(1-f_v)} \\ -\frac{i\omega A_g(1+(\gamma-1)f_k)}{\gamma\rho_m} & \frac{(f_k-f_v)}{(1-f_v)(1-\text{Pr})} \cdot \frac{1}{T_m} \cdot \frac{\Delta T_m}{\Delta x} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где ΔT_m — разность температур на концах сегмента. Здесь средняя плотность газа ρ_m , показатель адиабаты γ , число Прандтля Pr , а также функции f_k и f_v зависят от средней температуры газа T_m . Тогда для регенератора можно записать:

$$\begin{pmatrix} p_1(x) \\ U_1(x) \end{pmatrix} = M_{reg}(x) \begin{pmatrix} p_1(x_0) \\ U_1(x_0) \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$M_{reg}(x) = (E + \Delta x C_{n-1}^1(x)) \dots (E + \Delta x C_1^1(x)) (E + \Delta x C_0^1(x)). \quad (8)$$

Согласно работе [18], регенератор с сеточной насадкой можно моделировать, как пакет капиллярных цилиндрических каналов с внутренним радиусом:

$$r = \frac{\sqrt{D_h d}}{2}, \quad (9)$$

где $D_h = 4r_h$ — гидравлический диаметр ячеек.

Резонатор в рассматриваемом термоакустическом двигателе представляет собой акустическую нагрузку с импедансом Z_{res} , на которой рассеивается часть генерируемой акустической мощности. Его можно представить в виде двух последовательно соединённых каналов разного диаметра. В месте стыковки резонатора с тройником должны выполняться условия неразрывности для давлений и объемных скоростей (рис. 2)

$$p_1(0) = p_1(x_3); \quad (10)$$

$$U_1(0) = U_1(x_3) - K_{res} p_1(x_3), \quad (11)$$

где K_{res} — акустическая проводимость резонатора. В этом случае матрица преобразования для резонатора будет иметь вид:

$$M_{res} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -K_{res} & 1 \end{pmatrix}; \quad (12)$$

$$K_{res} = \frac{1}{Z_{res}}. \quad (13)$$

Тогда можно записать уравнение связи для давлений и объемных скоростей в рассматриваемом термоакустическом двигателе

$$\begin{pmatrix} p_1(x_3) \\ U_1(x_3) \end{pmatrix} = M_{ibt} M_{reg} M_{it} M_{res} \begin{pmatrix} p_1(x_3) \\ U_1(x_3) \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где M_{ibt} , M_{reg} , M_{it} , M_{res} — матрицы преобразования термической буферной трубы, регенератора, инерционной трубы и резонатора, соответственно.

Уравнение (14) в обобщенном виде выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} p_1(x_3) \\ U_1(x_3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11}(\omega, T_m(x)) & m_{12}(\omega, T_m(x)) \\ m_{21}(\omega, T_m(x)) & m_{22}(\omega, T_m(x)) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1(x_3) \\ U_1(x_3) \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Оно имеет решение только в том случае, если определитель матрицы равен нулю:

$$\det \left(\begin{pmatrix} m_{11}(\omega, T_m(x)) & m_{12}(\omega, T_m(x)) \\ m_{21}(\omega, T_m(x)) & m_{22}(\omega, T_m(x)) \end{pmatrix} - E \right) = 0. \quad (16)$$

где E — единичная матрица размерности 2×2 .

Отсюда, для рассматриваемого термоакустического двигателя легко получить следующее характеристическое уравнение:

$$1 + m_{11}m_{22} - m_{12}m_{21} - (m_{11} + m_{22}) = 0. \quad (17)$$

С его помощью можно определить параметры двигателя, при которых реализуется возбуждение акустических колебаний, и построить границы термоакустической неустойчивости. Это делается за счёт решения уравнения относительно комплексной угловой частоты $\omega = \text{Re}(\omega) + i\text{Im}(\omega)$, где $\text{Re}(\omega)$ — вещественная часть, а $\text{Im}(\omega)$ — мнимая часть частоты ω . Вещественная часть $\text{Re}(\omega)$ характеризует частоту акустических колебаний, а мнимая часть $\text{Im}(\omega)$ — коэффициент их демпфирования (если $\text{Im}(\omega) > 0$) или усиления (если $\text{Im}(\omega) < 0$). Моменту возбуждения акустических колебаний в двигателе соответствует ситуация, когда при определенной разности температур $\Delta T = (T_{hx} - T_{cx})$ на концах регенератора, коэффициент демпфирования (усиления) становится равным нулю.

Определение границ термоакустической неустойчивости с использованием приведенной модели термоакустического двигателя проводилось в компьютерном пакете Wolfram Mathematica 7. Исходные данные, которые закладывались в математическую модель, приведены в табл. 1.

Результаты и их обсуждение

Для определения адекватности предложенной математической модели был проведен эксперимент для высокотемпературного режима работы термоакустического двигателя, при котором температура теплообменника-охладителя T_{cx} поддерживалась на уровне 300 К, а температура теплообменника-нагревателя T_{hx} варьировалась в диапазоне значений от 420 до 750 К. На рис. 3 показана граница термоакустической неустойчивости

Таблица 1

Исходные данные

Table 1

Initial data

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Рабочее тело (газ) — гелий		Термическая буферная труба	
Среднее давление гелия p_m , МПа	0,5–3,0	Внутренний радиус R_{tbl} , мм	16
Инерционная труба		Длина L_{tbl} , мм	168
Внутренний радиус $R_{из}$, мм	16	Резонатор	
Длина $L_{из}$, мм	947	Внутренний радиус узкой части R_{th} , мм	16
Регенератор		Длина узкой части L_{th} , мм	1713
Внутренний радиус $R_{рег}$, мм	16	Внутренний радиус широкой части R_c , мм	36
Длина $L_{рег}$, мм	40	Длина широкой части L_c , мм	1460

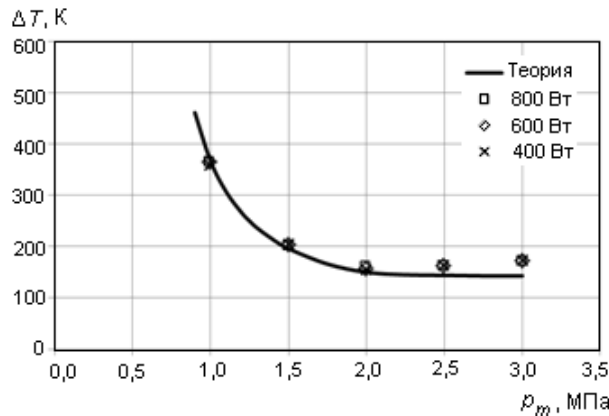


Рис. 3. Граница термоакустической неустойчивости в высокотемпературном режиме термоакустического двигателя при различных значениях подводимой тепловой мощности к гелию

Fig. 3. Boundary of thermoacoustic instability in high-temperature mode of thermoacoustic engine at various values of thermal input to helium

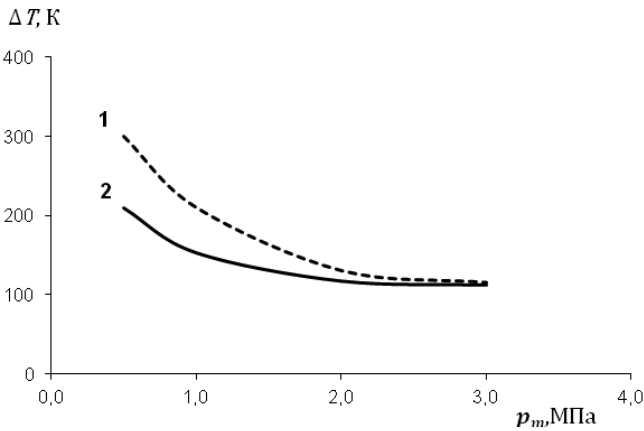


Рис. 4. Границы термоакустической неустойчивости в низкотемпературном режиме термоакустического двигателя: 1 — $T_m = 290$ К; 2 — $T_m = (T_{hx} + T_{cx})/2$

Fig. 4. Boundary of thermoacoustic instability in low-temperature mode of thermoacoustic engine: 1 — $T_m = 290$ К; 2 — $T_m = (T_{hx} + T_{cx})/2$

в высокотемпературном режиме термоакустического двигателя.

Как можно видеть, в диапазоне значений среднего давления гелия p_m от 2,0 до 3,0 МПа критическая разность температур ΔT , при которой происходит возбуждение акустических колебаний, принимает наименьшие значения. В зависимости от подводимой тепловой мощности Q_h она варьируется от 155 до 173 К. Хорошо видно, что с уменьшением значения среднего давления гелия p_m разность температур ΔT , требующаяся для запуска двигателя, резко возрастает. Предельное отклонение теоретических результатов по ΔT , полученное с использованием математической модели от экспериментальных данных составило 18%. Теоретические и экспериментальные значения частоты акустических колебаний f в термоакустическом двигателе практически совпали. К примеру, при среднем давлении гелия $p_m = 3,0$ МПа и средней температуре гелия $T_m = 290$ К в двигателе расчетное и экспериментальное значения частоты составили приблизительно 96 Гц, что свидетельствует об адекватности предложенной математической модели.

Затем проводилось моделирование низкотемпературного режима запуска термоакустического двигателя. На рис. 4 приведены результаты моделирования, при различных значениях средней температуры рабочего тела. В первом случае (кривая 1) средняя температура гелия T_m задавалась постоянной и равной нормальной температуре окружающей среды (290 К). Во втором случае (кривая 2) средняя температура T_m рассчитывалась как среднее значение от температур теплообменника-охладителя T_{cx} и теплообменника-нагревателя T_{hx} . При этом температура теплообменника-охладителя T_{cx} в ходе расчета варьировалась в диапазоне значений от 150 до 200 К. На практике такие низкие температуры можно обеспечить путем прокачки криогенного продукта через корпус теплообменника. Температура теплообменника-нагревателя T_{hx} задавалась постоянной и равной 300 К. Как можно видеть, при среднем давлении гелия $p_m = 3,0$ МПа обе кривые неустойчивости совпадают, т. е. возбуждение акустических колебаний должно реализовываться при разности температур $\Delta T = 130$ К. Однако с уменьшением p_m значения критической разности температур для

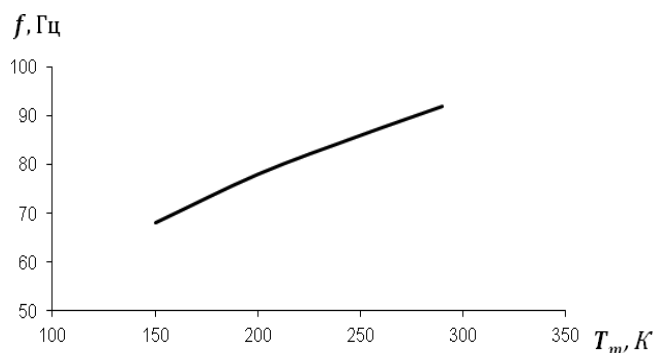


Рис. 5. Зависимость $f=f(T_m)$ при $p_m=3,0$ МПа, $T_{hx}=300$ К и $T_{cx}=110$ К

Fig. 5. Dependence $f=f(T_m)$ at $p_m=3.0$ МПа, $T_{hx}=300$ K, and $T_{cx}=110$ K

приведенных двух случаев начинают расходиться. Наибольшее расхождение наблюдается при $p_m=0,5$ МПа. В первом случае значение критической разности температур ΔT составляет 300 К, а во втором 210 К.

Причина такого расхождения, вероятно, кроется в том, что динамическая вязкость гелия μ зависит от его средней температуры T_m . С уменьшением средней температуры гелия T_m в компонентах двигателя потери акустической энергии на преодоление сил вязкого трения снижаются, вследствие уменьшения динамической вязкости гелия. Поэтому запуск двигателя должен осуществляться при более низкой разности температур ΔT на концах регенератора. Кроме того, величина акустических потерь в термоакустическом двигателе зависит еще и от частоты возбуждающихся акустических колебаний. С уменьшением частоты потери также снижаются. Частота акустических колебаний в любом термоакустическом двигателе определяется его геометрическими размерами, типом и температурой рабочего тела. На рисунке 5 показана зависимость частоты акустических колебаний f от средней температуры гелия T_m в двигателе при $p_m=3,0$ МПа, $T_{hx}=300$ К и $T_{cx}=110$ К.

Как можно видеть, в зависимости от средней температуры гелия частота акустических колебаний меняется в достаточно большом интервале — от 68 до 94 Гц. Поэтому при проектировании термоакустического двигателя необходимо учитывать температурные условия, в которых он будет работать. В противном случае можно будет получить ситуацию, когда проектные технические характеристики термоакустического двигателя будут сильно отличаться от реальных.

Заключение

С использованием математической модели термоакустического двигателя, в котором горячий тепловой источник имеет температурный уровень окружающей среды (300 К), а холодный тепловой источник имеет криогенный температурный уровень, определены границы термоакустической неустойчивости. Теоретически показано, что при снижении средней температуры рабочего тела (гелия) в двигателе критическая разность температур на концах регенератора, при которой происходит возбуждение акустических колебаний, значительно снижается. Причина такого снижения заключается в том, что динамическая вязкость гелия и частота возбуждающихся акустических

колебаний, которые определяют величину акустических потерь в компонентах двигателя, уменьшаются.

Полученные результаты можно использовать при создании термоакустических двигателей для преобразования теплоты в акустические колебания, которые будут востребованы в различных практических приложениях, например, для генерации электрической энергии и снижения затрат на регазификацию криопродуктов.

Благодарности

Результаты работы получены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Межкафедральный учебно-производственный научный центр САМ-ТЕХНОЛОГИЙ» при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2020-0019).

Литература/References

1. Backhaus S., Tward E., Petach M., Backhaus S. Traveling-wave thermoacoustic electric generator. *Applied Physics Letters*. 2004. V. 85 (6). P. 1085–1087.
2. Wang Y., Li Z., Li Q. A novel method for improving the performance of thermoacoustic electric generator without resonator. *Energy Conversion and Management*. 2016. V. 110. P. 135–141.
3. Wu Z., Zhang L., Dai W., Luo E. Investigation on a 1 kW traveling-wave thermoacoustic electrical generator. *Applied Energy*. 2014. V. 124. P. 140–147.
4. Wu Z., Yu G., Zhang L., Dai W., Luo E. Development of a 3 kW double-acting thermoacoustic Stirling electric generator. *Applied Energy*. 2014. V. 136. P. 866–872.
5. Bi T., Wu Z., Zhang L., Yu G., Luo E., Dai W. Development of a 5 kW traveling wave thermoacoustic electric generator. *Applied Energy*. 2015. V. 185 (Part 2). P. 1355–1361.
6. Wang K., Qiu L., Wang B., Sun D., Lou P., Rao J., Zhang X. A standing wave thermoacoustic engine driven by liquid nitrogen. In: *Advances in Cryogenic Engineering: AIP Conference Proceedings*. 2012. V. 1434. P. 351–358.
7. Qiu L., P. Lou, K. Wang, B. Wang, D. Sun, J. Rao, X. Zhang Characteristics of onset and damping in a standing-wave thermoacoustic engine driven by liquid nitrogen. *Chinese Science Bulletin*. 2013. V. 58 (11). P. 1325–1330.
8. Taconis K. W., Beenakker J. J. M., Nier A. O. C., Aldrich L. T. Measurements concerning the vapour-liquid equilibrium of solutions of He3 in He4 below 2.19 K. *Physica*. 1949. V. 15 (8-9). P. 733–739.
9. Clement J. R., Gaffney J. Thermal Oscillations in Low Temperature Apparatus. *Advances in Cryogenic Engineering*. 1950. V. 1. P. 302–306.
10. Rott N. Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 1969. V. 20. P. 230–243.
11. Rott N. Thermally driven acoustic oscillations. Part II: Stability limit for helium. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. 1973. V. 24. P. 54–72.
12. Merkli P., Thomann H. Thermoacoustic effects in a resonance tube. *Journal of fluid mechanics*. 1975. V. 70 (1). P. 161–177.
13. Yazaki T., Tominaga A., Narahara Y. Stability limit for thermally driven acoustic oscillation. *Cryogenics*. 1979. V. 19. P. 393–396.
14. Yazaki T., Iwata A., Maekawa T., Tominaga A. Travelling wave thermoacoustic engine in a looped tube. *Physics Review Letters*. 1998. V. 81 (15). P. 3128–3131.

15. Зиновьев Е. А., Воротников Г. В., Харитонов А. А., Лысенков В. В. Экспериментальное исследование рабочего процесса термоакустического двигателя на бегущей волне. // Динамика и виброакустика. 2018. Т. 4. (2). С. 18–26. [Zinoviev E. A., Vorotnikov G. V., Kharitonov A. A., Lysenkov V. V. Experimental study of the working process of a thermoacoustic engine on a traveling wave. *Dynamics and vibroacoustics*. 2018. Vol. 4. (2). Pp. 18–26. (in Russian)]
16. Swift G. W. Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators. Acoustical Society of America, New York. 2017. 326 pp.
17. Belcher J. R., Slaton W. V., Raspet R., Bass H. E., Lightfoot J. Working gases in thermoacoustic engines. *Journal of Acoustical Society of America*. 2009. V. 105 (5). P. 2677–2684.
18. Ueda Y., Kato T., Kato C. Experimental evaluation of the acoustic properties of stacked-screen regenerators. *Journal of Acoustical Society of America*. 2009. V. 125 (2). P. 780–786.

Сведения об авторах

Зиновьев Евгений Александрович

К. т. н., старший научный сотрудник НОЦ ГДИ-209 Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, eazinovyev@gmail.com

Воротников Геннадий Викторович

К. т. н., старший научный сотрудник НОЦ ГДИ-209 Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, vorotnikov.g.v@mail.ru

Довгялло Александр Иванович

Д. т. н., профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, d. a. i@mail.ru

Некрасова Светлана Олеговна

К. т. н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, yhoji@yandex.ru

Information about authors

Zinoviev Evgeny A.

Ph. D., Senior Researcher, SEC GDI-209, Samara National Research University named after Academician S. P. Koroleva, 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, eazinovyev@gmail.com

Vorotnikov Gennady V.

Ph. D., Senior Researcher, SEC GDI-209, Samara National Research University named after Academician S. P. Koroleva, 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, vorotnikov.g.v@mail.ru

Dovgyallo Alexander I.

D. Sc., Professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Koroleva, 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, d. a. i@mail.ru

Nekrasova Svetlana O.

Ph. D., Associate Professor of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Koroleva, 443086, Russia, Samara, Moscow highway, 34, yhoji@yandex.ru



7th IIR Conference on Sustainability and the Cold Chain

The IIR conference series on Sustainability and the Cold Chain is recognised as a cutting-edge event on the cold chain which addresses the ever-increasing demand for knowledge-sharing in this essential sector. This prestigious biennial conference attracts international audiences of researchers and industrialists, providing an opportunity to showcase the latest developments in sustainability, retail refrigeration and the cold chain.

Start date: April 01, 2022

End date: April 30, 2022

Location: Newcastle, United Kingdom

- **Main commissions:** Refrigerating equipment; Cryobiology, cryomedicine; Food science & engineering
- **Themes:** Cold chain, interfaces

Organisers:

IOR (Institute of Refrigeration, UK)

Contact:

iccc2020@sciencesconf.org

Official websites:

<https://iifir.org/en/events/7th-iir-conference-on-sustainability-and-the-cold-chain>