

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ НА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ

Термоакустические двигатели представляют собой устройства с внешним подводом тепла, в которых осуществляется преобразование тепловой энергии в энергию акустических колебаний. К их основным преимуществам можно отнести высокую эффективность преобразования энергии (до 35 %), минимальное количество подвижных частей, высокую надежность, отсутствие контактных уплотнений и работу от разнообразных источников тепловой энергии (углеводородные топлива, тепловые выбросы, ядерные источники, солнечное излучение и т.д.). Основная цель данной работы заключается в разработке, изготовлении и проведении экспериментальных исследований термоакустического двигателя на бегущей волне с максимальной подводимой тепловой мощностью от электрического нагревательного элемента до 1000 Вт. Конструктивно термоакустический двигатель включает в себя инерционную трубу, три теплообменника, регенератор, термическую буферную трубу и акустический резонатор. В качестве рабочего тела в двигателе выступает гелий при среднем давлении от 1,0 до 3,0 МПа. Частота колебаний гелия на установившемся режиме работы двигателя составляет 96-98 Гц. Регенератор выполнен в виде пакета металлических сеток и является основным элементом двигателя, в котором осуществляется термоакустическое преобразование энергии.

**Е.А. Зиновьев,
Г.В. Воротников,
А.А. Харитонов,
В.В. Лысенков**

АО «РКЦ» «Прогресс»
ул. Земеца, 18,
г. Самара, Российская Федерация,
443009

ezinovyev@gmail.com
vorotnikov.g.v@mail.ru
haritonov.aleksandr2011@yandex.ru
lysvlad10@yandex.ru

В процессе экспериментальных исследований решались следующие задачи:

- определение оптимальных условия возбуждения акустических колебаний во внутреннем контуре термоакустического двигателя;
- определение минимальной температуры запуска термоакустического двигателя;
- определение зависимостей температуры запуска, частоты акустических колебаний и амплитуды акустического давления от подводимой тепловой мощности;
- определение внутреннего КПД термоакустического двигателя, который характеризует эффективность преобразования тепловой энергии в энергию акустических колебаний при максимальной подводимой тепловой мощности к рабочему телу.

В ходе проведения экспериментальных исследований определено оптимальное среднее давление гелия, при котором обеспечивается минимальная температура нагревателя, необходимая для запуска двигателя 436 К (163 °С). Максимальное значение генерируемой регенератором акустической мощности составило 90 Вт. При этом эффективность преобразования тепловой энергии в энергию акустических колебаний достигала 22,5 % при температуре нагревателя 317 °С. Также в ходе проведения испытаний удалось установить зависимости температуры запуска, частоты акустических колебаний и амплитуды акустического давления от подводимой тепловой мощности.

Описанный в данной работе тип двигателя может найти применение во многих практических приложениях.

Ключевые слова: Термоакустический двигатель; акустические колебания; бегущая волна; регенератор; термоакустический эффект

1 Введение

Процесс самовозбуждения акустических колебаний газа в трубах при подводе тепла привлек к себе внимание еще в XVIII веке.

Первое качественное объяснение возникновения акустических колебаний газа при подводе теплоты было дано Дж. Рэлеем в 1887 году. В своей работе “Теория звука” [1], рассматривая цилиндрическую трубу с колеблющимся поршнем, он показал, что при периодическом подводе тепла к газу можно управлять колебательным движением, т.е. усиливать или ослаблять его. Все зависит от разности фаз между подводом теплоты и колебаниями поршня. Если отвлечься от поршня и заменить его элементом газового объема, то все определяется разностью фаз между подводом тепла и волнами сжатия или разрежения. Это дало Дж. Рэлею возможность сформулировать критерий для термоакустических эффектов в газах. “Если теплота сообщается воздуху в момент наибольшего сжатия или отнимается от него в момент наибольшего разрежения, то это усиливает колебания” [1].

Революционный прорыв в этой области был сделан Н. Роттом. Рассматривая акустические колебания, генерируемые теплом, он опубликовал серию научных работ [2-7], в которых описывалась линейная теория термоакустики. В них Н. Ротт сформулировал математическую основу возникновения и затухания низкоамплитудных колебаний в широких и узких трубах при наличии продольного градиента температуры.

В последующие тридцать лет основные положения линейной теории Н. Ротта были обобщены и развиты Г. Свифтом, наиболее подробно они изложены в его монографии [8]. Важнейшим результатом проведенных им за эти годы исследований явилось создание тепловых машин принципиально нового типа – термоакустических двигателей. Они представляют собой устройства с внешним подводом тепла, работающие по замкнутому

регенеративному циклу. Термоакустические двигатели преобразуют подводимое тепло в акустические колебания рабочего газа. В практическом плане эти колебания могут быть использованы для генерации электрической энергии, разделения смесей газов или для приведения в действие термоакустических охладителей, работающих в обратном цикле. Термоакустические двигатели коренным образом отличаются от традиционных тепловых двигателей минимальным количеством подвижных механических частей, простотой конструкции, сравнительно высокой эффективностью и надежностью, низким уровнем стоимости и экологической безопасностью.

2 Конструкция термоакустического двигателя

На рисунке 1 представлена конструкция термоакустического двигателя на бегущей волне, разработанного в АО «РКЦ «Прогресс». Двигатель представляет собой акустический волновод тороидальной конфигурации, в котором последовательно размещаются следующие элементы: инерционная труба 1, супрессор 2, основной охладитель 3, регенератор 4, нагреватель 5, термическая буферная труба 6, дополнительный охладитель 7 и тройник 8. К тороидальному волноводу стыкуется акустический резонатор 9. В качестве рабочего тела в двигателе используется гелий при среднем давлении во внутреннем контуре от 1,0 до 3,0 МПа. Параметры основных конструктивных узлов приведены в таблице 1.

Подвод тепла к рабочему телу двигателя обеспечивается электрическим нагревательным элементом, намотанным на нагреватель, который представляет собой медный теплообменник пластинчатого типа. Максимальная мощность электрического нагревательного элемента составляет 1000 Вт. Отвод тепла в двигателе осуществляется основным и дополнительным охладителями,

которые также представляют собой медные теплообменники пластинчатого типа.

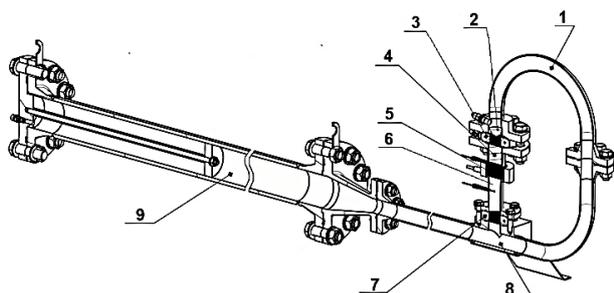


Рисунок 1. Термоакустический двигатель на бегущей волне

Регенератор выполнен в виде пакета металлических бронзовых сеток и является основным элементом двигателя, в котором осуществляется преобразование подводимой тепловой энергии в акустические колебания высокой интенсивности.

Таблица 1. Основные геометрические параметры термоакустического двигателя на бегущей волне

Параметр	Значение
Инерционная труба	
Внутренний диаметр, мм	32
Длина, мм	947
Основной и дополнительный охладители	
Внутренний диаметр, мм	32
Пористость	0,74
Зазор между пластинами, мм	1,5
Длина, мм	20
Регенератор (сеточный – ГОСТ 6613-86)	
Внутренний диаметр, мм	32
Пористость	0,686
Гидравлический радиус пор, мкм	32
Длина, мм	40
Нагреватель	
Внутренний диаметр, мм	32
Пористость	0,6
Зазор между пластинами, мм	1,5
Длина, мм	30
Термическая буферная труба	
Внутренний диаметр, мм	32
Длина, мм	80
Резонатор	
Внутренний диаметр узкой части, мм	32
Длина узкой части, мм	1713
Длина конического переходника, мм	125
Внутренний диаметр широкой части, мм	73
Длина широкой части, мм	1460

Подвод тепла к рабочему телу двигателя обеспечивается электрическим нагревательным элементом, намотанным на нагреватель, который представляет собой медный теплообменник пластинчатого типа. Максимальная мощность электрического нагревательного элемента составляет 1000 Вт. Отвод тепла в двигателе осуществляется основным и дополнительным охладителями, которые также представляют собой медные теплообменники пластинчатого типа.

Регенератор выполнен в виде пакета металлических бронзовых сеток и является основным элементом двигателя, в котором осуществляется преобразование подводимой тепловой энергии в акустические колебания высокой интенсивности.

Супрессор представляет собой диафрагму с припуском, выполненную из легкой плащевой ткани, которая служит для подавления циркуляционного течения, при минимальном искажении акустической волны.

На рисунке 2 представлена схема расположения датчиков во внутреннем контуре термоакустического двигателя на бегущей волне.

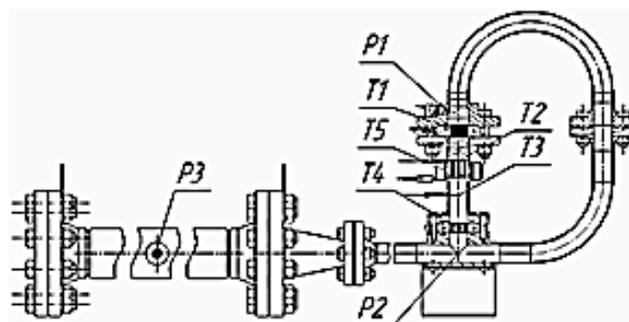


Рисунок 2. Схема расположения датчиков во внутреннем контуре термоакустического двигателя на бегущей волне. P1-P3 – датчики динамического давления; T1-T5 – датчики температуры

3 Результаты экспериментальных исследований

В ходе проведения эксперимента установлено, что при различных значениях электрической мощности нагревателя P_{el}

запуск термоакустического двигателя происходит только при определенных значениях среднего давления гелия p_m и соответствующей разности температур на концах регенератора $\Delta T = T_h - T_c$. Значения этих параметров определяют область возбуждения акустических колебаний, которая ограничивается кривой устойчивости (рисунок 3).

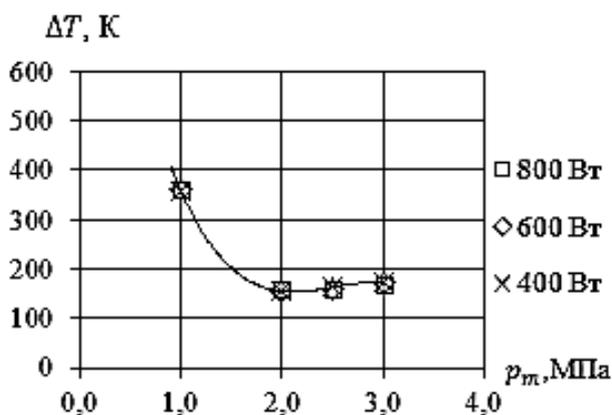


Рисунок 3. Кривая устойчивости термоакустического двигателя

Из приведенных на рисунке 3 результатов следует, что наиболее благоприятные условия для запуска термоакустического двигателя реализуются в диапазоне значений среднего давления гелия p_m от 2,0 до 3,0 МПа. При этом в зависимости от электрической мощности P_{el} разность температур на концах регенератора ΔT принимает значения от 155 до 173 К. При среднем давлении гелия $p_m = 1,0$ МПа возбуждение колебаний реализуется уже при разности температур ΔT , значения которой попадают в интервал от 357 до 363 К. Согласно теории, с уменьшением значения среднего давления гелия p_m разность температур ΔT на концах регенератора, требующаяся для запуска двигателя, возрастает экспоненциально. Однако, экспериментальная кривая после $p_m = 2$ МПа плавно возрастает. Это объясняется ростом вязких потерь, которые при выводе уравнений линейной акустики считаются величинами второго порядка малости. Для реализации самоподдерживающихся

колебаний необходимо, чтобы разность температур на концах регенератора ΔT и среднее давление гелия p_m лежали в пределах области неустойчивости, которая находится выше кривой устойчивости.

В случае проведения испытаний без супрессора наблюдалось резкое увеличение выноса тепла с нагревателя к дополнительному охладителю за счёт возникновения циркуляционного течения. Как следует из рисунка 4, температура T_2 на нагревателе при этом падает, а в термической буферной трубе T_3 и дополнительном охладителе T_4 возрастает. Количественная оценка показывает, что генерация акустической энергии при этом падает на 40%.

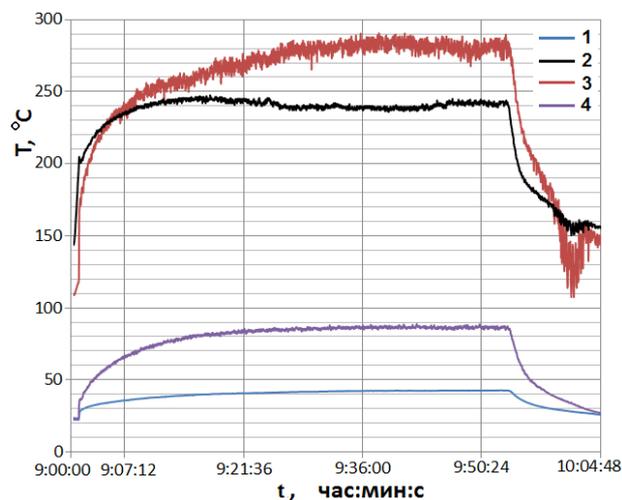


Рисунок 4. Графики эволюции температур от момента пуска до остывания установки после выключения нагревателя до исходных значений: 1 – температура T_1 на основном охладителе; 2 – температура T_2 на нагревателе, 3 - температура T_3 в середине термической буферной трубы; 4 - T_4 температура на дополнительном охладителе

В ходе проведения эксперимента было установлено, что для фиксированного среднего давления гелия p_m температура нагревателя, необходимая для запуска двигателя, находится в прямой зависимости от мощности P_{el} электрического нагревательного элемента (рисунок 5). Этот эффект в большей или меньшей мере наблюдался на всём диапазоне рабочих

давлений p_m , на которых двигатель имел устойчивый процесс запуска, независимо от того, с какой температуры T_m начинался нагрев.

Данное явление позволяет сделать вывод о том, что процесс запуска требует определённого количества энергии, которая накапливается медленнее, чем идёт рост температуры вблизи датчиков.

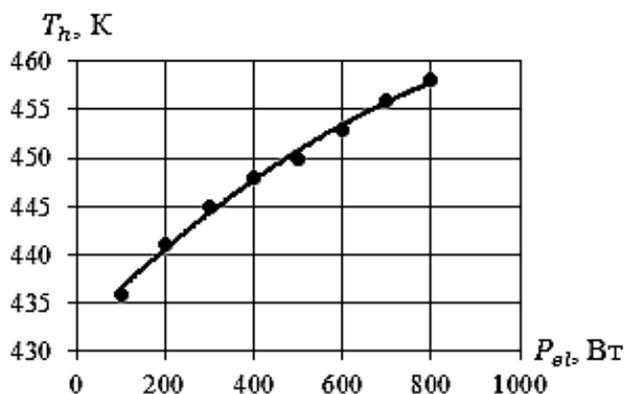


Рисунок 5. Зависимость температуры нагревателя, необходимой для запуска термоакустического двигателя, от мощности P_{el} электрического нагревательного элемента при среднем давлении гелия $p_m = 3,0$ МПа

Из приведенных данных хорошо видно, что минимальная мощность электрического нагревательного элемента, при которой реализуется возбуждение акустических колебаний во внутреннем контуре термоакустического двигателя, составляет всего 100 Вт. При этом моменту возбуждения соответствует температура на нагревателе около 436 К (163 °С).

На рисунке 5 представлена зависимость амплитуды акустического давления от мощности P_{el} электрического нагревательного элемента. Максимальная амплитуда давления $|p|$ достигается на входе в регенератор (датчик P1) и при мощности $P_{el} = 100$ Вт она равна 30 кПа, что составляет 1,0 % от среднего давления гелия $p_m = 3,0$ МПа. Как следует из графика, с увеличением электрической мощности P_{el} амплитуда давления $|p|$ возрастает линейно.

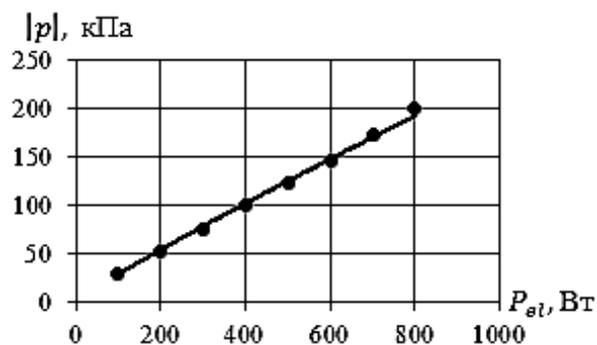


Рисунок 6. Зависимость амплитуды акустического давления от мощности P_{el} при среднем давлении гелия $p_m = 3,0$ МПа

На рисунке 7 приведены колебания акустического давления в термоакустическом двигателе, которые реализуются на стационарном режиме работы при среднем давлении гелия $p_m = 3,0$ МПа и максимальной электрической мощности $P_{el} = 800$ Вт. Хорошо видно, что акустические колебания во всех точках проведения измерений (датчики P1, P2 и P3) имеют вид гармонической функции. Максимальная амплитуда колебаний давления $|p|$ достигается также на входе в регенератор (датчик P1), она составляет 200 кПа (6,7 % от среднего давления p_m).

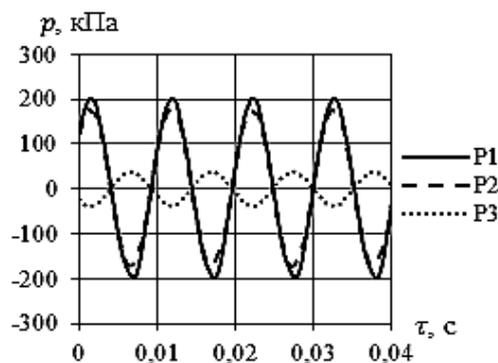


Рисунок 7. Колебания акустического давления в термоакустическом двигателе на стационарном режиме работы при $p_m = 3,0$ МПа и $P_{el} = 800$ Вт

В ходе проведения эксперимента было установлено, что с увеличением электрической мощности P_{el} от 200 до 800 Вт частота акустических колебаний f сильно не изменяется и возрастает практически

линейно от 96 до 98 Гц. Такое незначительное изменение частоты акустических колебаний f обусловлено тем, что высокотемпературная зона очень мала по сравнению с остальной длиной акустического тракта.

В таблице 2 приведены основные технические характеристики термоакустического двигателя при максимальной подводимой тепловой мощности 800 Вт от электрического нагревательного элемента.

Таблица 2. Основные технические характеристики термоакустического двигателя при мощности электрического нагревательного элемента 800 Вт

Параметр	Значение
Рабочее тело	гелий
Среднее давление гелия, МПа	3,0
Частота акустических колебаний, Гц	98
Тепловая мощность, отводимая основным охладителем, Вт	226
Температура гелия в основном охладителе, К	310
Тепловая мощность, подводимая к гелию через нагреватель, Вт	346
Температура гелия в нагревателе, К	590 К
Тепловая мощность, отводимая дополнительным охладителем, Вт	120
Температура гелия в дополнительном охладителе, К	311
Внутренний КПД термоакустического двигателя, %	22,5

4 Заключение

Проведенная работа по созданию и исследованию термоакустического двигателя на бегущей волне позволяет сделать следующие выводы:

- создан действующий термоакустический двигатель на бегущей волне, который не требует устройства принудительного запуска;
- экспериментально определены наиболее благоприятные условия для запуска рассматриваемого термоакустического двигателя;

- минимальная температура запуска разработанного термоакустического двигателя составляет всего 436 К (163 °С);

- экспериментально получены зависимости температуры запуска, частоты акустических колебаний и амплитуды акустического давления от подводимой тепловой мощности;

- внутренний КПД термоакустического двигателя, который характеризует эффективность преобразования тепловой энергии в энергию акустических колебаний составляет 22,5 % при температуре нагревателя 590 К (317 °С).

В целом проведенные экспериментальные исследования подтвердили правильность выбранных конструктивных решений при создании основных элементов термоакустического двигателя. Для создания реальных энергосистем, работающих на основе термоакустического преобразования энергии, необходимо проведение дополнительных исследований в части стыковки и согласования между собой термоакустических двигателей и электроакустических преобразователей.

Список использованных источников:

- [1] Стретт Дж. (Лорд Рэлей). Теория звука / Дж. Стретт (Лорд Рэлей) // М.: Гостехиздат. – 1944. – Т. 2. – 475 с.
- [2] Rott N. Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes / N. Rott // Journal of Applied Mathematics and Physics. – 1969. – Vol. 20. – P. 230-243.
- [3] Rott N. Thermally driven acoustic oscillations. Part II: Stability limit for helium / N. Rott // Journal of Applied Mathematics and Physics. – 1973. – Vol. 24. – P. 54-72.
- [4] Rott N. The influence of heat conduction on acoustic streaming / N. Rott // Journal of Applied Mathematics and Physics. – 1974. – Vol. 25. – P. 417-421.
- [5] Rott N. Thermally driven acoustic oscillations. Part III: Second-order heat flux / N. Rott // Journal of Applied Mathematics and Physics. – 1975. – Vol. 26. – P. 43-49.
- [6] Rott N. Thermally driven acoustic oscillations. Part IV: Tubes with variable cross-section / N. Rott // Journal of Applied Mathematics and Physics. – 1976. – Vol. 27. – P. 197-224.

[7] Zouzoulas G. Thermally driven acoustic oscillations. Part V: Gas-liquid oscillations / G. Zouzoulas // Journal of Applied Mathematics and Physics. – 1976. – Vol. 27. – P. 325-334.

[8] Swift G. W. Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators / G. W. Swift // Acoustical Society of America, New York. – 2017. – 326 p.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE THERMOACOUSTIC TRAVELING-WAVE ENGINE

Evgeniy A. Zinovyev,
Gennadiy V. Vorotnikov,
Aleksandr A. Kharitonov,
Vladimir V. Lysenkov

Joint Stock Company Space Rocket
Centre Progress
18, Zemetsa street, Samara,
443009, Russian Federation
eazinovyev@gmail.com
vorotnikov.g.v@mail.ru
haritonov.aleksandr2011@yandex.ru
lysvlad10@yandex.ru

Thermoacoustic engines are devices with external heat input, in which thermal energy is converted into energy of acoustic oscillations. Their main advantages include high energy conversion efficiency (up to 35%), minimal number of moving parts, high reliability, absence of contact seals and operation from a variety of heat sources (hydrocarbon fuels, thermal emissions, nuclear sources, solar radiation, etc.). The main goal of this work is to develop, manufacture and carry out the experimental investigations of the thermoacoustic traveling wave engine with a maximum heat input from the electric heating element up to 1000 W. The thermoacoustic engine includes an inertance tube, three heat exchangers, a regenerator, a thermal buffer tube and an acoustic resonator. Helium acts as the working fluid in the engine at an average pressure of 1.0 to 3.0 MPa. The frequency of acoustic oscillations on the steady-state operating mode of the engine is 96-98 Hz. The regenerator is made in the form of a package of metal screens and is the main element of the engine, in which thermoacoustic energy conversion is carried out.

In experimental research the following tasks were solved:

- determination of the optimal conditions for the excitation of acoustic oscillations in the internal contour of the thermoacoustic engine;

- determination of the minimum onset temperature at which acoustic oscillation are excited;

- determination of the dependences of the onset temperature, the frequency and the amplitude of acoustic oscillations from the input thermal power;

- determination of the efficiency of the thermoacoustic energy conversion;

In experimental studies, an optimal mean helium pressure is determined, which ensures the minimum heat exchanger temperature 436 K (163 °C) required to start the engine. The maximum value of the acoustic power generated by the regenerator was 90 W. At the same time, the efficiency of conversion of thermal energy into acoustic energy reached 22.5% at a heat exchanger-heater temperature of 317 °C. Also during the tests, it was possible to establish the dependences of the onset temperature, the frequency of acoustic oscillations and the amplitude of the acoustic pressure on the supplied thermal power. This type of engine described in this paper can be used in many practical applications.

Key words: *Thermoacoustic engine; acoustic oscillations; traveling wave; regenerator; thermoacoustic effect*

References

- [1] Strutt, J. W. (Baron Rayleigh) (1926), "The Theory of Sound", *Macmillan and Co. Limited*, vol. 2, 475 p.
- [2] Rott, N. (1969), "Damped and thermally driven acoustic oscillations in wide and narrow tubes", *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol. 20, pp. 230-243.
- [3] Rott, N. (1973), "Thermally driven acoustic oscillations. Part II: Stability limit for helium", *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol. 24, pp. 54-72.
- [4] Rott, N. (1974), "The influence of heat conduction on acoustic streaming", *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol. 25, pp. 417-421.
- [5] Rott, N. (1975), "Thermally driven acoustic oscillations. Part III: Second-order heat flux", *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol. 26, pp. 43-49.
- [6] Rott, N. (1976), "Thermally driven acoustic oscillations. Part IV: Tubes with variable cross-section", *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol. 27, pp. 197-224.

[7] Zouzoulas, G. (1976), “Thermally driven acoustic oscillations. Part V: Gas-liquid oscillations”, *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol. 27, pp. 325-334.

[8] Swift, G. W. (2017), *Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, Acoustical Society of America, New York, 326 p.