

Оценка различных методов моделирования термоакустических колебаний

12, декабрь 2015

Угланов Д. А.¹, Некрасова С. О.¹, Воробьев А. А.^{1,*}, Соколов Г. В.¹

УДК 004.942

¹Россия, СГАУ имени академика С.П. Королева

*andrej-vorobev@yandex.ru

Введение

Термоакустика – раздел акустики о взаимном преобразовании тепловой и акустической энергии, который появился при слиянии термодинамики и акустики. Начало термоакустике, имеющей почти двухсотлетнюю историю, было положено в 1777г, когда Д. Хиггинс проводил эксперименты с открытой стеклянной трубкой, в которой акустические колебания возбуждались с помощью водородной горелки [1]. Позже похожий опыт, но с проволочной сеткой, повторял П. Рийке, а в 1850 г. Сондхаусс исследовал явление возникновения звука, обнаруженное стеклодувами – чистый звук генерировался при нагреве шарообразного утолщения стеклянной трубки. И хотя различные опыты в рамках термоакустики известны человечеству уже довольно давно, как самостоятельная дисциплина термоакустика возникла в конце 70-х годов двадцатого века [2-5].

Первый качественный анализ колебаний, вызванных теплом, сделал в 1887 г. Лорд Рэлей [6]. Сформулированное Рэлеем пояснение термоакустических явлений, известное так же как принцип Рэрея, звучит следующим образом: «Если теплота сообщается газу в момент наибольшего сжатия или отнимается от него в момент наибольшего разрежения, то это усиливает акустические колебания». Несмотря на свою простоту, эта формулировка полностью описывает термоакустический эффект.

1. Постановка задачи

Рассматриваемый в данной работе резонатор, представляет собой колбу с пористой вставкой внутри и, являясь устройством для экспериментального исследования возникновения акустических колебаний. В данном аспекте он рассматривается как модель термоакустического двигателя на стоячей или бегущей волне. Воздух внутри резонатора Гельмгольца испытывает колебания давления и колебания скорости. Подобно телу на пружине, воздух в горловине колбы колеблется за счет податливости воздуха в колбе (рис. 1). При некоторых условиях имеет место затухание колебаний, как происходит при преобладании трения над энергией волны.

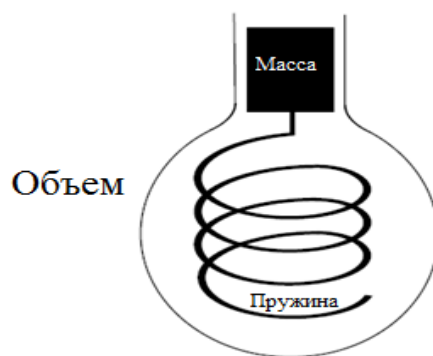


Рис. 1. Аналогия резонатора Гельмгольца с пружинным маятником

Теоретически доказано и экспериментально подтверждено возникновение акустической мощности в резонаторе [7,8], если в определенном месте горловины расположить пористую насадку при условии наличия градиента температур на ее концах (рис. 2). Очевидно, что пористая насадка увеличивает гидравлическое сопротивление системы, однако воздействие этого сопротивления может быть уменьшено путем обеспечения разности температур на противоположных концах пористой вставки. При этом начинается генерация звуковых волн, причем мощность производимых звуковых колебаний напрямую зависит от расположения пористой насадки внутри колбы.

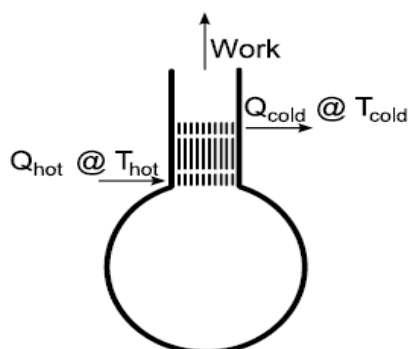


Рис. 2. Термоакустический генератор звуковых колебаний на основе резонатора Гельмгольца

2. Результаты эксперимента

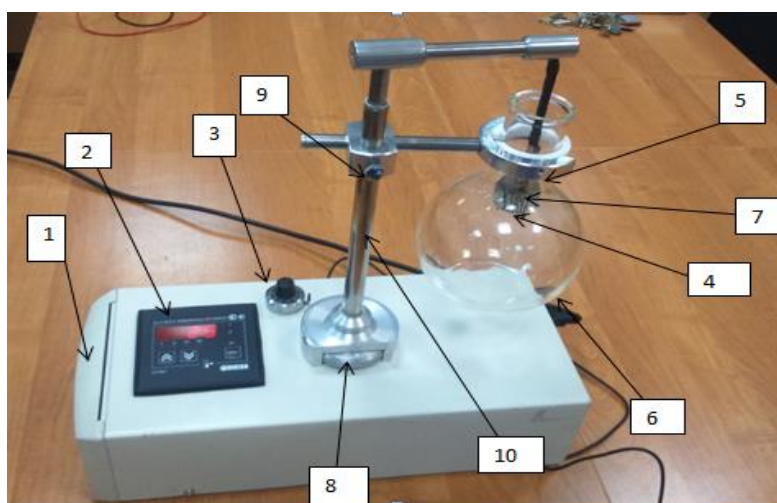


Рис. 3. Экспериментальная установка

1–индикатор питания, 2– измеритель регулятор 2ТРМ1, 3–реостат, 4–нагреватель, 5–микрофон, 6–колба, 7–регенератор, 8–тонкая настройка высоты штатива, 9–грубая настройка высоты штатива, 10–штатив

Экспериментальная установка представлена на рис.3. В качестве пористой насадки (регенератора) была применена пористая керамическая структура с ячейками $y_0 \times y_0 = 0,8 \times 0,8$ мм² и длиной вставки 20 мм. На одном конце регенератора производился нагрев с помощью нихромовой проволоки (горячий теплообменник), на другом охлаждение, осуществляемое водой по прилегающей медной трубке (холодный теплообменник).

В ходе эксперимента производилось измерение амплитуды давления в горловине резонатора. В качестве датчика акустического давления использовался микрофон и программный продукт Sound Card Oscilloscope, который совместно с компьютером выполнял функции двухканального осциллографа с частотой пропускания в диапазоне от 20 до 20000 Гц. Всего было исследовано четыре положения регенератора относительно открытого конца резонатора $h = 65, 70, 75, 80$ мм. Положение $h = 70$ мм соответствует положению верхней части регенератора в зоне перехода горловины резонатора к сферической полости колбы. Из результатов исследований, приведенных в таблице 1, видно, что наибольшее значение амплитуды давления, а, следовательно, и наибольшая акустическая мощность достигаются при положении регенератора $h = 65$ мм.

Таблица 1. Результаты эксперимента

Положение верхней кромки, h , мм	T_n , К	f , Гц	p , Па
80	691	162,19	76
	702	163,5	158
	710	164,07	83
	722	165,1	40
	730	166,32	16
75	662	161,1	55
	675	162	78
	689	162,78	178
	699	163,82	223
	710	164,53	145
	721	165,77	98
	728	166,52	82
70	665	161,55	65
	672	162,39	77
	691	164,02	90
	701	164,43	129
	710	164,93	87
	717	165,83	65
	732	167,12	33
65	660	161,53	67
	675	163,2	90
	689	164,35	150
	701	165,48	255
	711	166,05	210
	720	166,85	120
	730	168,85	69

Зависимость частоты колебаний в резонаторе Гельмгольца от температуры горячего теплообменника представлена на рисунке 4. Данная зависимость объясняется изменением теплофизических свойств рабочего тела с увеличением температурного перепада между горячим и холодным теплообменником и в дальнейших численных расчетах не учитывается. Изменения частоты в диапазоне температур 670 - 730 К составляло менее 3%.

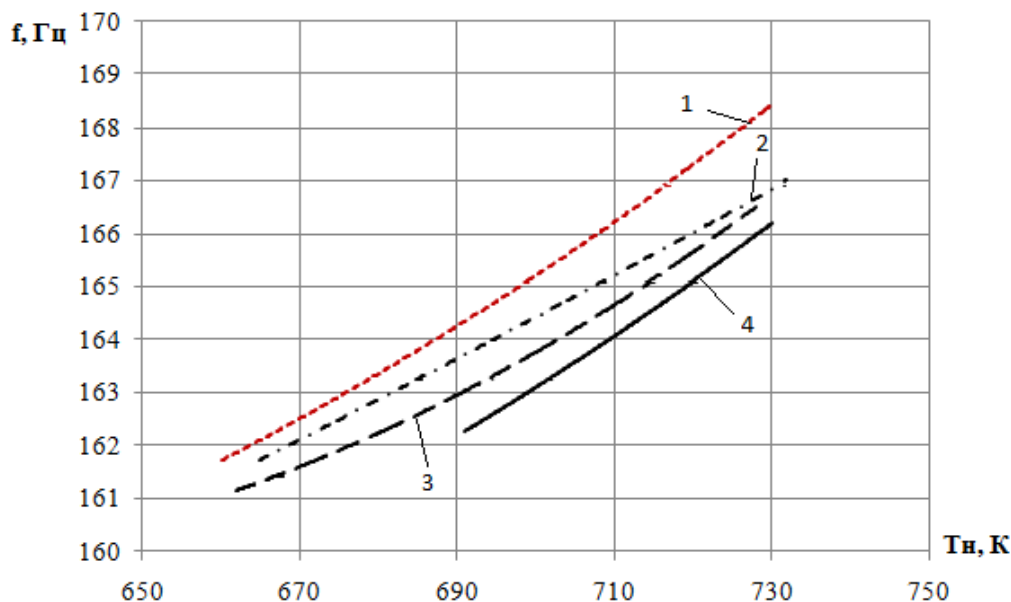


Рис. 4. Зависимость частоты колебаний от температуры нагревателя:
1 – $h=65$ мм; 2 – $h=70$ мм; 3 – $h=75$ мм; 4 – $h=80$ мм.

Зависимость амплитуды акустических колебаний от положения регенератора внутри резонатора Гельмгольца неоднозначна. Как следует из рис. 5, наибольшую акустическую мощность колба демонстрирует при $h=65$ мм и температуре нагревателя $T_n=701$ К.

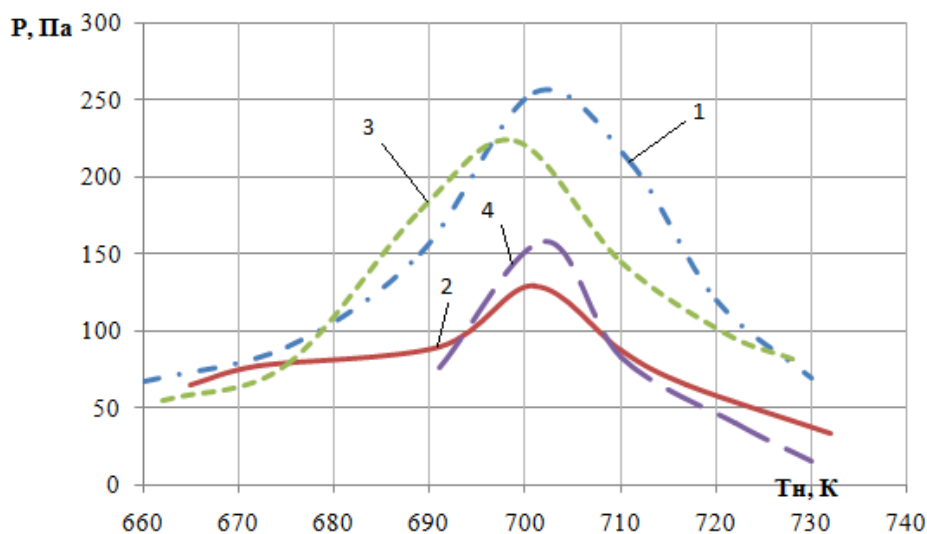


Рис. 5. Зависимость амплитуды колебаний от температуры нагревателя:
1 – $h=65$ мм; 2 – $h=70$ мм; 3 – $h=75$ мм; 4 – $h=80$ мм.

3. Численное моделирование в программе DeltaEC

Далее для исследуемого объекта, рассматриваемого как модель термоакустического двигателя, произведен расчет изменения параметров в DeltaEC (Design Environment for Low-amplitude ThermoAcoustic Energy Conversation - разработка Los Alamos National Laboratory, USA, свободная лицензия) [9], предназначенная для моделирования акустических устройств и описания термоакустических процессов в них и являющаяся основным средством получения их конструктивных параметров. DeltaEC выполняет численное интегрирование в одном измерении, используя низкоамплитудную линейную аппроксимацию уравнений Ротта для решения одномерных волновых уравнений последовательности сегментов конструкции и гармоническую временную зависимость изменения рабочих параметров. Рабочий контур термоакустического резонатора разбивался по длине на сегменты (рис.6). Комплексные величины давления и объемной скорости рассчитываются от сегмента к сегменту с учетом граничных условий и заданных параметров "целей" и "предположений" для выполнения численного интегрирования основных уравнений линейной термоакустики.

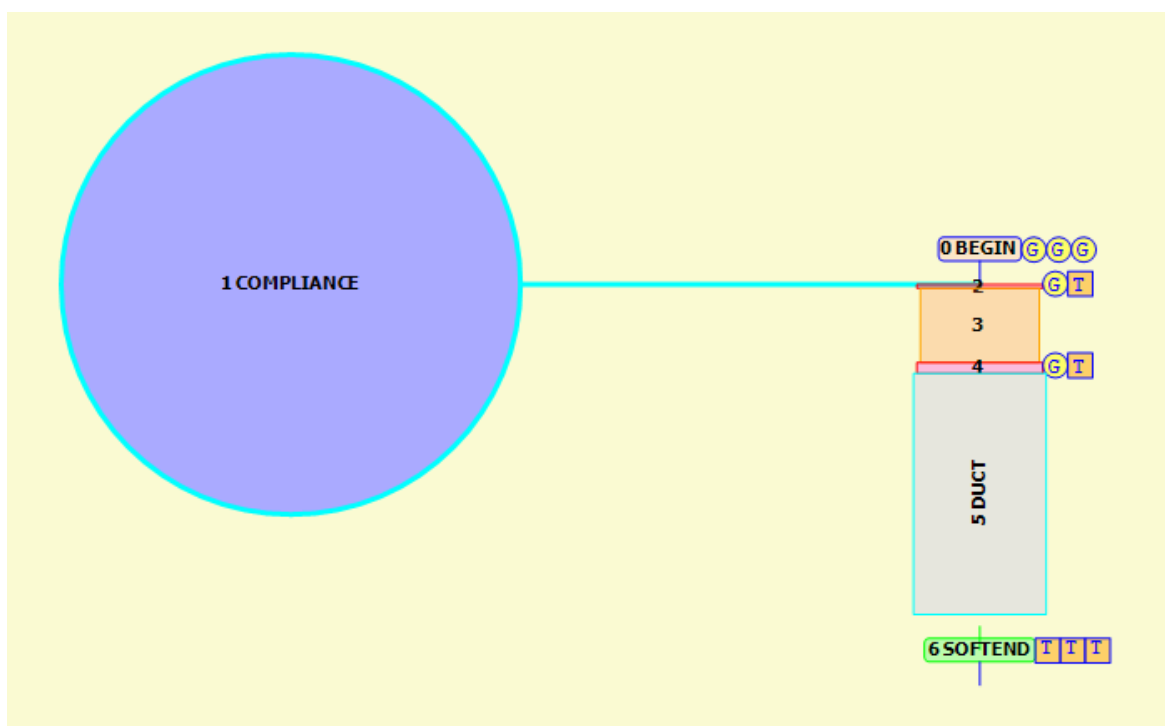


Рис. 6. Схема расчета модели резонатора Гельмгольца в программе DeltaEC

T - "target" фиксированные значения параметров "целей": температуры горячего и холодного концов регенератора, значение мнимой и действительной частей импеданса системы, G - "guess" варьируемые значения "предположений": рабочая частота и количество подводимого и отводимого тепла на концах регенератора

Данная модель построена для положения регенератора $h=65$ мм, температуры нагревателя $T_H = 700$ К и демонстрирует хорошую сходимость с результатами эксперимента:

- резонансная частота $f = 180,3$ Гц ($f_{\text{эксп}}=165,48$ Гц),
- амплитуда давления в области открытого конца резонатора $p_{\text{расч}}=278$ Па ($p_{\text{эксп}}=255$ Па).

4. Численное моделирование в программе ESI-CFD Advanced

Выполненные расчеты в программе DeltaEC позволяет получить конструктивные размеры термоакустического двигателя, но эти данные не дают информации об особенностях рабочего процесса термоакустического резонатора. Для решения этой задачи использовался программный пакет ESI-CFD Advanced [10], в котором была построена сеточная модель резонатора (рис. 7). Построение модели выполнялось в подмодуле ESI-GEOM, расчет – в ESI-ACE+, обработка результатов в ESI-VIEW.

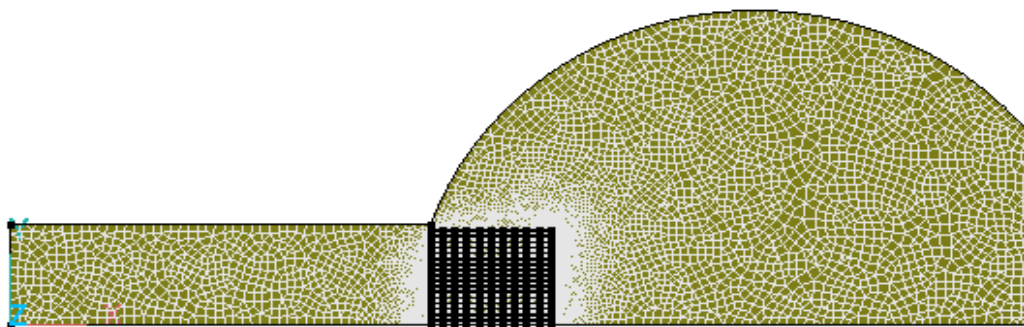


Рис. 7. Сеточная модель резонатора Гельмгольца

Пористое тело, созданное в данной модели, представляет собой тонкие пластинки толщиной 0,2 мм и длиной 20 мм, расположенные на расстоянии 0,8 мм друг от друга (рис. 8) и имеющие характеристики керамического материала ($\rho = 2100 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 750 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $\lambda = 1 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$). При расчете на стенки пластин наложено постоянное во времени распределение температур, задаваемое уравнением $T(x) = 500 + 200 \cdot \sin(50\pi(x - 0,075))$ для $x \in [0,065; 0,085]$.

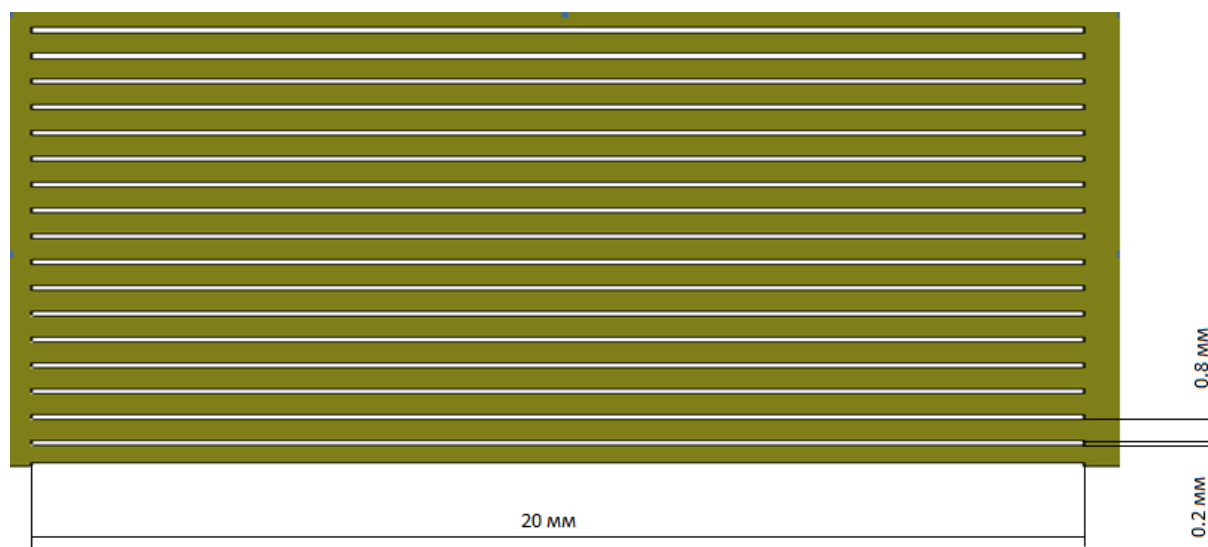


Рис. 8. Модель пористого регенератора

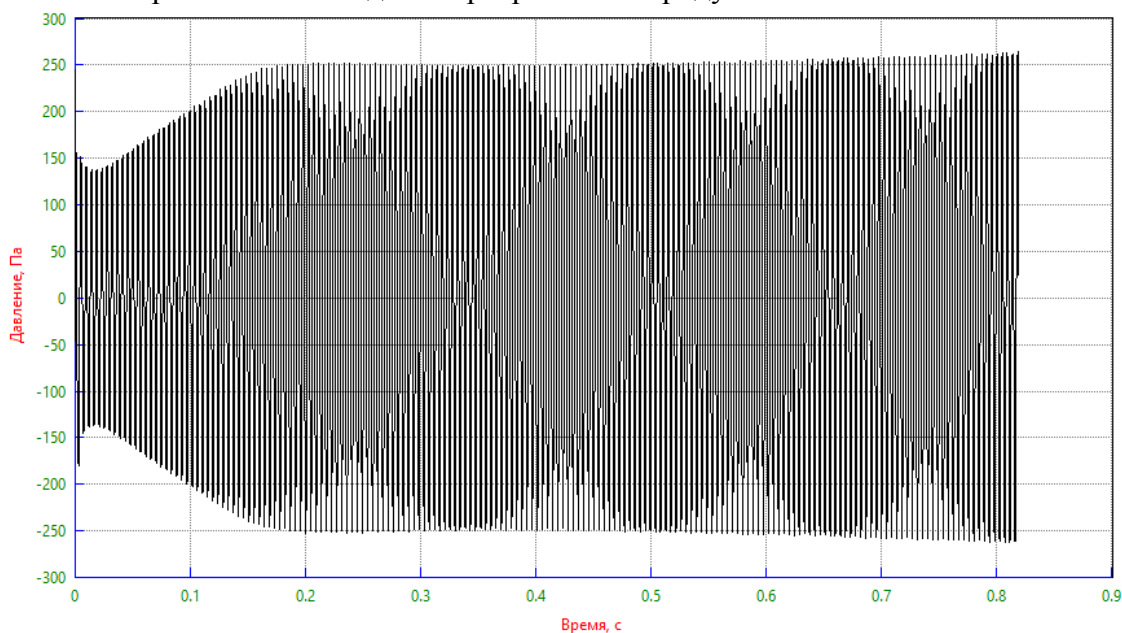
Как и в эксперименте, всего было исследовано четыре положения регенератора относительно горловины колбы. На рисунке 9 (а, б, в, г) представлены графические зависимо-

сти амплитуды давления в горловине резонатора по времени при выходе на установившийся режим для каждого положения регенератора.

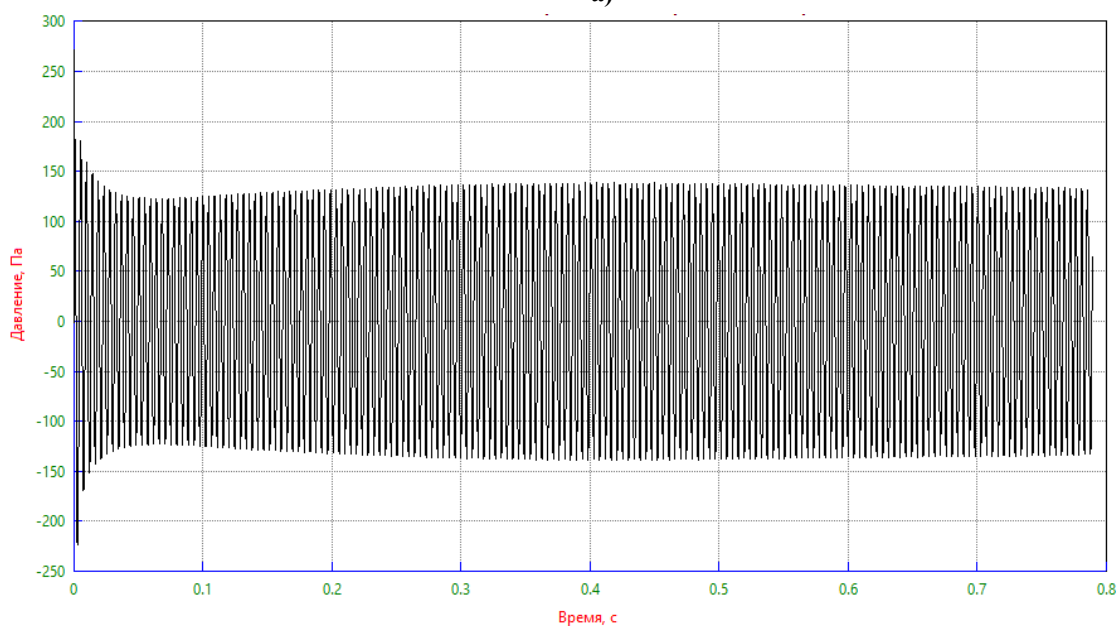
Результаты расчета по амплитудам давления, представленные на рисунке 9, близки к результатам, полученным в ходе эксперимента (рис. 5). Однако разница между расчетной и экспериментальной частотой велика: $f_{\text{расч}} = 210$ Гц, $f_{\text{эксп}} = 165,48$ Гц. Это объясняется тем, что в расчетной модели не полностью учтены все условия эксперимента:

- граничные условия модели – адиабатные;
- не учитываются турбулентные потоки;
- сечение входного отверстия больше реального сечения, так как последнее загромождено стержнем, держащим регенератор, микрофон и трубки с охлаждением.

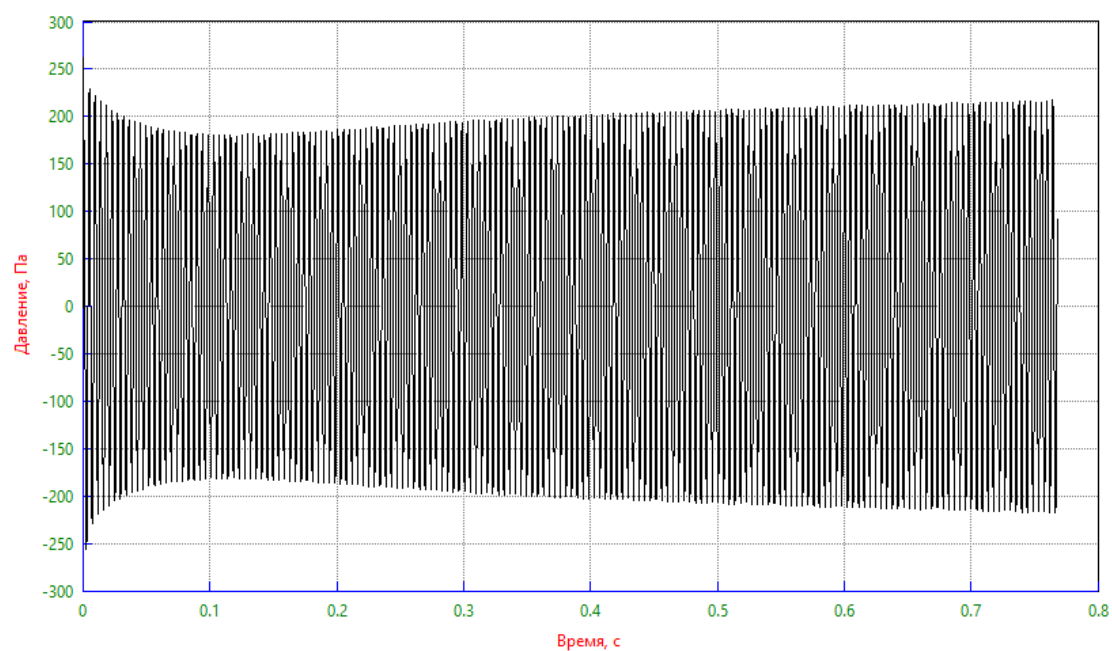
Несмотря на это различие в частоте в 30% вполне приемлемо для подтверждения применимости расчетных методик и программных продуктов.



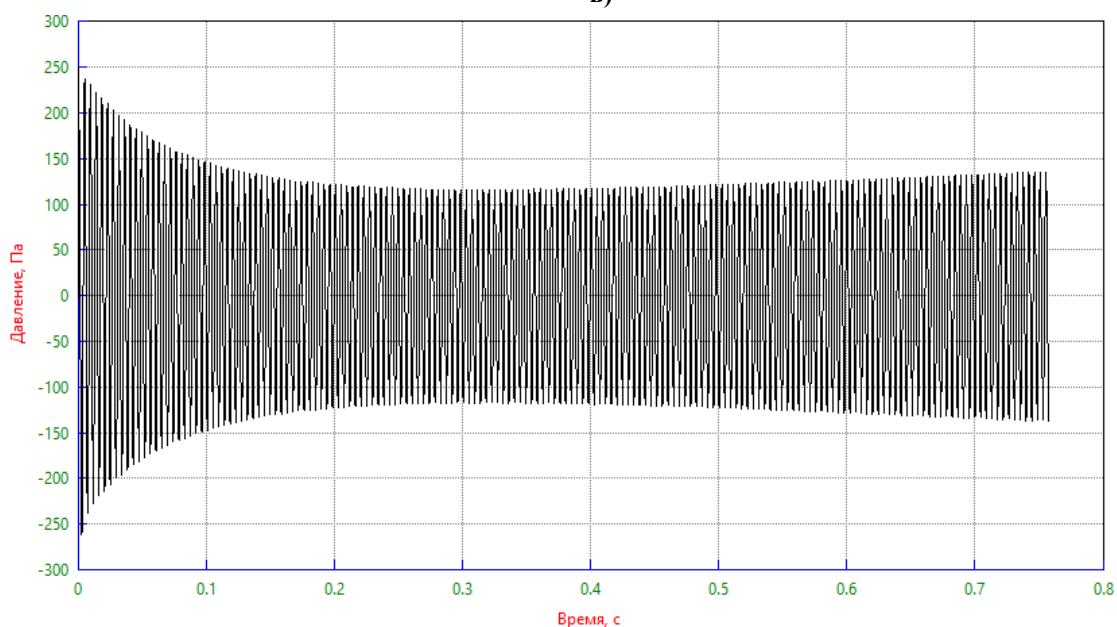
а)



б)



б)



г)

Рис. 9. Давление в горловине резонатора амплитуд давления в программе ESI-CFD при температуре

$T_H = 700$ К:

а) $h = 65$ мм; б) $h = 70$ мм; в) $h = 75$ мм; г) $h = 80$ мм

Таблица 2. Сравнение результатов при $T_H = 700$ К

Положение верхней кромки h , мм	Значения рабочих параметров модели					
	$P_{\text{эксп}}$, Па	$f_{\text{эксп}}$, Гц	P_{DeltaEC} , Па	f_{DeltaEC} , Гц	P_{ESI} , Па	f_{ESI} , Гц
65	255	165,48	278	176,8	252	210
70	130	164,43	140	175,3	138	208
75	223	163,82	213	174,9	204	206
80	158	163,5	137	174,4	139	205

Заключение

Проведено численное и экспериментальное исследование рабочего процесса модели термоакустического двигателя на основе резонатора Гельмгольца. Получены расчетные значения рабочей частоты и амплитуды давления имеют удовлетворительную сходимость с экспериментом для модели DeltaEC. Расхождения значений рабочей частоты процесса в ESI-CFD Advanced от экспериментальных значений объясняются допущениями, принятыми в модели. Для более достоверного описания процессов тепломассопереноса в регенераторе требуется задание функций изменения теплофизических свойств от температуры.

Список литературы

- [1]. Wheatley J.C., Swift G.W., Migliori A. The natural heat engine // Los Alamos Science. 1986. No. 14. P. 2–47. Режим доступа: <http://la-science.lanl.gov/lascience14.shtml> (дата обращения: 1.12.2015)
- [2]. Garrett S.L., Backhaus S. The power of sound // American Scientist. 2000. No. 88 (6). P. 515-525.
- [3]. Swift G.W., Garrett S.L. Thermoacoustics: A Unifying Perspective for Some Engines and Refrigerators. // The Journal of the Acoustical Society of America. 2003. Vol. 113. No. 5. P. 2379-2381. DOI: [10.1121/1.1561492](https://doi.org/10.1121/1.1561492)
- [4]. Swift G.W. Thermoacoustic engines. // Journal of the Acoustical Society of America. 1988. Vol. 84. No. 4. P. 1145–1180. DOI: [10.1121/1.396617](https://doi.org/10.1121/1.396617)
- [5]. Swift G.W. Analysis and performance of a large thermoacoustic engine. // Journal of the Acoustical Society of America. 1992. Vol. 92 No. 3. P. 1551–1563. DOI: [10.1121/1.403896](https://doi.org/10.1121/1.403896)
- [6]. Lord Rayleigh J.W.S. The explanation of certain acoustical phenomena. // Nature. London: 1878. Vol. 18. P. 319—321.
- [7]. Bastyr K.J., Keolian R.M. High-frequency thermoacoustic – Stirling heat engine demonstration device. // The Journal of the Acoustical Society of America. 2003. Vol. 4. No. 2. P. 37-40. DOI: [10.1121/1.1558931](https://doi.org/10.1121/1.1558931)
- [8]. Wheatley J.C. Intrinsically irreversible or natural engines // In Frontiers in Physical Acoustics, Proceedings of the E. Fermi Summer School, Corso XCIII. Soc. Italiana di Fisica, Bologna, Italy. 1986. P. 395–475.
- [9]. Ward W.C., Swift G.W. Design environment for low amplitude thermoacoustic engines (DeltaE). // The Journal of the Acoustical Society of America. 1994. Vol. 95. No. 6. P. 3671–3672. DOI: [10.1121/1.409938](https://doi.org/10.1121/1.409938)
- [10]. ESI-CFD-Inc., CFD-ACE+ V2009.4 User Manual, ESI Group, Huntsville, AL, 2009.