

УДК 536

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ И АКУСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В УСТРОЙСТВЕ ТИПА РЕЗОНАТОРА ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Е.В. Семенова¹, В.М. Ларионов¹, Ю.В. Ваньков²

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия

² Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

evgeniya.yallina@gmail.com

Резюме: Одним из перспективных приложений пульсационного горения является утилизация промышленных отходов. Имеется математическая модель и результаты расчета частоты и амплитуды акустических колебаний газа в устройстве типа резонатора Гельмгольца, использующем твердое топливо. В данной работе пульсационное горение рассматривается как результат взаимодействия акустических колебаний с процессом тепловыделения в зоне горения. Показано, что частота и амплитуда колебаний газа, амплитуда и фаза пульсаций скорости тепловыделения, акустическая энергия, генерируемая в зоне горения, – есть взаимосвязанные величины.

Ключевые слова: пульсационное горение, твердое топливо, термодинамические характеристики, параметры колебаний.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-5-6-141-147

THERMODYNAMIC AND ACOUSTIC ANALYSIS OF THE SOLID FUEL PULSATING COMBUSTION IN A HELMHOLTZ RESONATOR TYPE DEVICE

E.V. Semenova¹, V.M. Larionov, Yu.V. Vankov²

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

evgeniya.yallina@gmail.com

Abstract: One of the perspective applications of pulsating combustion is the utilization of industrial waste. There is a mathematical model and the results of calculating the frequency and amplitude of acoustic gas oscillations in a Helmholtz resonator type device using solid fuel. In this paper, pulsating combustion is considered as a result of the interaction of acoustic oscillations with the process of heat release in the combustion zone. It is shown that the frequency and amplitude of gas oscillations, the amplitude and phase of the heat release rate pulsations, the acoustic energy generated in the combustion zone are interrelated quantities.

Keywords: pulsation combustion, solid fuel, thermodynamic characteristics, vibration parameters

Введение

Одним из перспективных приложений пульсационного горения является

утилизация промышленных отходов [1–9]. В работах [11–13] была разработана математическая модель пульсационного горения в установке типа резонатора Гельмгольца, состоящей из камеры сгорания, в которой происходит сжатие и разрежение газа, и двух резонансных труб, в которых газ совершает колебательное движение. Были проведены расчеты условий возбуждения, частоты и амплитуды колебаний газа. Однако термодинамическая составляющая процесса пульсационного горения осталась неизученной. Целью данной работы является анализ пульсационного горения как процесса взаимодействия акустических колебаний газа с тепловым источником, расположенным в камере сгорания рассматриваемой установки. Будут рассчитаны акустические параметры: частота и амплитуда колебаний газа и соответствующие термодинамические параметры: пульсации скорости тепловыделения и акустическая энергия, получаемая газом в единицу времени, которая равна работе, совершаемой над газом в результате периодического подвода теплоты.

Базовые соотношения

Схема исследуемой установки показана на рис. 1.

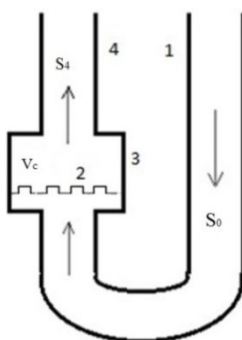


Рис. 1. Принципиальная схема установки

1 – воздухоподающая труба; 2 – решётка, удерживающая топливо;
3 – камера сгорания; 4 – труба для выхода продуктов сгорания

Далее приводятся известные соотношения [10], которые будут использованы в данной работе. Уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$A_{c,N} = A_{d,N} = A_{w,0} + A_{i,0} + A_{w,4} + A_{i,4}. \quad (1)$$

Акустическая энергия $A_{c,N}$, получаемая газом в зоне горения за единицу времени, потери акустической энергии на стенках воздухоподающей трубы $A_{w,0}$, потери, вызванные излучением звука из воздухоподающей трубы $A_{i,0}$, потери акустической энергии в трубе для выхода продуктов сгорания $A_{w,4}$, $A_{i,4}$ определяются соотношениями:

$$A_c = (a_{c,L} - a_{c,N} p_c) p_c^2, \quad A_{w,0} = a_{w,0} p_c^2, \quad A_{i,0} = (a_{i,0,L} + a_{i,0,N} p_c) p_c^2, \quad (2)$$

$$A_{w,4} = a_{w,4} p_c^2, \quad A_{i,4} = (a_{i,4,L} + a_{i,4,N} p_c) p_c^2. \quad (3)$$

Коэффициенты, входящие в соотношения (2), (3), связывающие акустические энергии с амплитудой пульсаций давления в зоне горения, находятся по известной методике.

Пульсации давления газа и скорости тепловыделения в камере сгорания имеют вид:

$$\text{Re } p' = p_c \cos \omega t, \quad \text{Re } q' = q \sin(\omega \tau_u - \omega t).$$

Частоты колебаний газа находятся из общего уравнения [11], соответствующего установкам рассматриваемого типа:

$$\frac{b_4}{2\omega} + \beta_4 \operatorname{tg} \phi_4 + F_0^{-1} = 0,$$

$$F_0 = \left(\frac{\omega V_c}{c_1 S_c} - \frac{\varepsilon_0}{\bar{Y}_0} \right) \frac{c_1}{c_{4,0}}, \quad \varepsilon_0 = \frac{S_0}{S_c}, \quad \bar{Y}_0 = \frac{Y_0}{\rho_{1,0} c_1},$$

где b_4 – градиент скорости звука в трубе для выхода продуктов сгорания; $\beta_4 = \sqrt{1 - (b_4/2\omega)^2}$; ϕ_4 – фазовый угол, соответствующий открытому концу трубы; Y_0 – импеданс воздухоподающей трубы.

Подставляя соотношения (2), (3) в уравнение (1), получим формулы:

$$p_c = \frac{a_{c,L} - a_{w,1} - a_{w,3} - a_{w,4} - a_{1,L} - a_{3,L} - a_{4,L}}{a_{c,N} + a_{1,N} + a_{3,N} + a_{4,N}};$$

$$I_c = 20 \log(10^5 p_c / 2),$$

определяющие амплитуду установившихся колебаний давления в зоне горения и соответствующий уровень звукового давления I_c .

Результаты

Расчет проводился применительно к горению древесных кубиков с длиной ребра 1 см. Известно, что за 5 минут происходит практически полное сгорание 8 кубиков. Вычисления показывают, что в этом случае средняя тепловая мощность процесса горения равна 310 Вт. Исходные данные, необходимые для расчета пульсационного режима горения, были заимствованы из предшествующих работ [11; 13]. Как известно [12], акустическая энергия, получаемая газом в зоне горения, прямо пропорциональна $\sin(\omega \tau_u)$ и обратно пропорциональна мнимой части акустического импеданса воздухоподающей трубы Y_0 . В табл. 1 приведены результаты расчета частоты и амплитуды колебаний газа, амплитуды пульсаций скорости тепловыделения, средней за период колебаний акустической энергии, получаемой газом в зоне горения за единицу времени, и фазового сдвига $\omega \tau_u$ между пульсациями скорости тепловыделения и пульсациями скорости воздуха, поступающего в камеру сгорания.

Таблица 1

Акустические и термодинамические параметры пульсационного горения

f , Гц	p_c , Па	$\omega \tau_u$	l_0 , м	Y_0 , Па·с/м	q , Вт	A_c , Вт	Частота
64	1685	1,31	1,2	2847	149	0,35	первая
156	144	2,15	1,2	145	49	0,01	вторая
67	1843	1,35	3,6	1579	224	0,57	вторая

Анализ показал, что $A_c > 0$, если при $Y_0 > 0$ фазовый сдвиг $\omega \tau_u$ изменяется от 0 до π , а при $Y_0 < 0$ – от π до 2π . Согласно табл. 1 при $l_0 = 1,2$ м для первой и второй частоты колебаний $Y_0 > 0$, а фазовый сдвиг $\omega \tau_u$ равен 1,31 и 2,15 соответственно, что удовлетворяет условию возбуждения колебаний. Однако акустическая энергия, получаемая газом в случае колебаний с первой частотой, значительно превышает энергию, соответствующую колебаниям со второй частотой. Поэтому реально будут наблюдаться колебания с первой частотой. Для воздухоподающей трубы длиной $l_0 = 3,6$ м фазовый сдвиг $\omega \tau_u$ становится настолько малым, что получаемая газом акустическая энергия меньше ее потерь и колебания с первой частотой не возбуждаются. Вторая частота колебаний понижается настолько, что $\omega \tau_u = 1,35$, что близко к оптимальному значению $\pi/2$. При этом амплитуда пульсаций скорости тепловыделения и получаемая газом акустическая энергия даже превышают значения, соответствующие колебаниям с

первой частотой, при $l_0 = 1,2$ м. Аналогичные расчеты были выполнены для колебаний, параметры которых показаны на рис. 2.

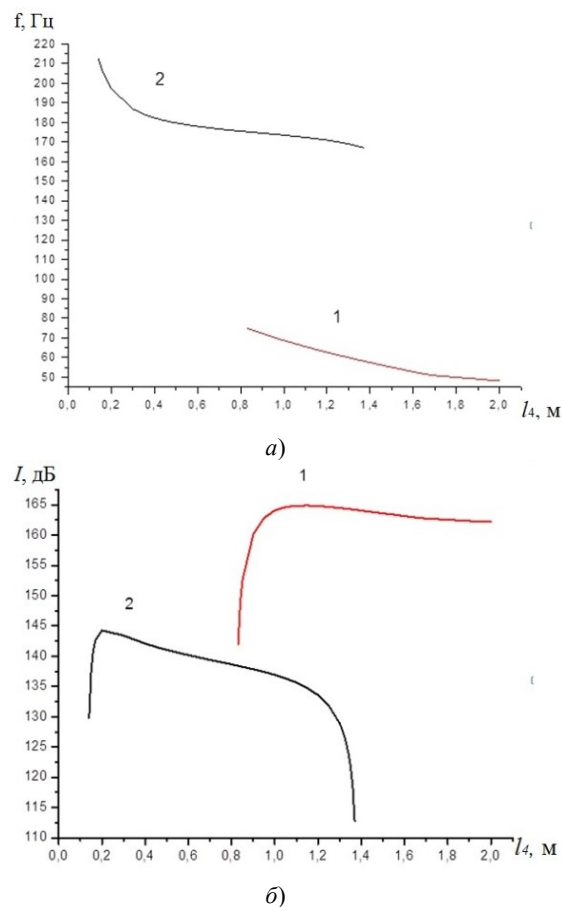


Рис. 2. Зависимости частоты (а) и уровня звукового давления (б) от длины резонансной трубы при фиксированной длине трубы для выхода продуктов сгорания $l_0=1,07$ м и $R_4=0,015$ м, $R_0=0,02$ м, $l_c=0,14$ м, $R_c=0,05$ м

Вычисления показали, что при $l_4 = 0,2$ м для колебаний с первой частотой (кривая 1) $Y_0 < 0$, то есть пульсационное горение возникает, если $\pi < \omega_1 \tau_u < 2\pi$. Однако, колебания не возбуждаются, так как $\omega_1 \tau_u = 1,93$. Для второй частоты (кривая 2) $\omega_2 \tau_u = 2,44$, но поскольку $Y_0 > 0$, условие возбуждения колебаний $0 < \omega_2 \tau_u < \pi$ выполняется. Амплитуда пульсаций скорости тепловыделения и получаемая газом акустическая энергия таковы, что в камере сгорания устанавливается режим с амплитудой пульсаций давления в зоне горения 219 Па. В случае $l_4 = 1,1$ м для обеих частот $Y_0 > 0$ и условие возбуждения колебаний газа выполняется, так как $\omega_1 \tau_u$ и $\omega_2 \tau_u$ находятся в интервале от 0 до π .

Однако амплитуда пульсаций скорости тепловыделения и получаемая газом акустическая энергия в случае первой частоты значительно превосходят значения, соответствующие второй частоте. Поэтому реально пульсационное горение будет сопровождаться колебаниями газа с первой частотой. При $l_4 = 1,6$ м для колебаний со второй частотой $Y_0 < 0$. Так как $\omega_2 \tau_u$ меньше π , газ не получает акустическую энергию ($A_c < 0$) и такие колебания не возникли.

Таблица 2

Термодинамические характеристики пульсационного горения

f , Гц	p_c , Па	$\omega\tau_u$	l_4 , м	Y_0 , Па · с/м	q , Вт	A_c , Вт	Частота
127		1.93	0.2	-300		<0	первая
197	219	2.44	0.2	410	25	0.007	вторая
66	2614	1.33	1.1	1523	251	0.911	первая
172	80	2.27	1.1	120	39	0.004	вторая
53	2257	1.15	1.6	728	189	0.590	первая
152		2.12	1.6	-57		<0	вторая

Для первой частоты $Y_0 > 0$, $\omega\tau_u < \pi$, что соответствует условию возбуждения колебаний. Амплитуда пульсаций скорости тепловыделения и величина получаемой газом акустической энергии таковы, что становится возможным возбуждение колебания газа с частотой 53 Гц и амплитудой колебаний давления в зоне горения 2257 Па. Отметим, что максимальная величина 2614 Па (УЗД в камере сгорания 160 дБ) наблюдается при $l_4 = 1,1$ м, когда амплитуда пульсаций скорости тепловыделения достигает 0,8 среднего значения 310 Вт, фазовый сдвиг $\omega\tau_u$ близок к оптимальной величине $\pi/2$, а получаемая газом в единицу времени акустическая энергия порядка 1 Вт.

Для условий, соответствующих результатам расчета при $l_0 = 3,6$ м, был проведен анализ пульсаций давления в зоне горения и пульсаций скорости тепловыделения в течение одного цикла (рис. 3).

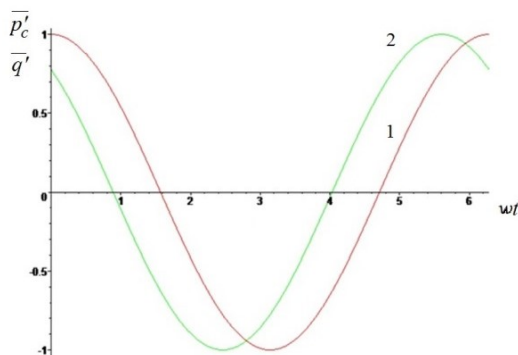


Рис. 3. Сравнение пульсаций давления (1) в зоне горения и скорости тепловыделения (2)

Использовались безразмерные величины: $\overline{p'_c} = p'_c / p_c = \cos \omega t$,

$\overline{q'} = q' / q = \sin(\omega\tau_u - \omega t)$. Видно, что в рассматриваемом случае режим пульсационного горения наблюдается при выполнении общего термодинамического условия Рэлея: если фазовый сдвиг между колебаниями давления и колебаниями скорости теплоподвода по абсолютному значению меньше $\pi/2$, колебания возбуждаются; если фазовый сдвиг лежит в пределах от $\pi/2$ до π , колебания гасятся.

Заключение

Установлено, что при пульсационном горении твердого топлива в установке типа резонатора Гельмгольца амплитуда пульсаций скорости тепловыделения достигает 0,8 среднего значения тепловой мощности камеры сгорания 310 Вт, а уровень звукового давления в камере сгорания достигает 160 дБ. Характерно, что в таком режиме газ в зоне

горения в единицу времени получает небольшое количество акустической энергии – порядка 1 Вт.

Литература

1. Carvalho J.A. Behavior of solid particles in pulsating flows // Sound and Vibration. 1995. Vol. 185. P. 581–593.
2. Таймаров М.А., Шарипов М.Р. Котёл пульсирующего горения природных и пиролизных газов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Том 16, № 21. С. 133–135.
3. Бида Л.А., Гешеле В.Д., Левчук А.С., Плещанков И.Г., Полежаев, Ю.В., Раскатов И.П., Соловьев В.Н., Фокина Г.И. Вибрационное горение как перспектива утилизации загрязненного радиоцезием древесного топлива // Инженерно-физический журнал. 2013. № 1. С. 145–151.
4. Бокун И.А. Сжигание низкосортных топлив и биомассы в пульсирующем слое // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2013. № 6. С. 58–64.
5. Филипов С.Е., Ларионов В.М. Вибрационное горение твердого топлива в устройстве типа «емкость–труба» // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2004. № 1–2. С. 135–138.
6. Novozhilov B.V. Linear analysis of hotspot-pulsating mode of propellant combustion / B.V. Novozhilov // Russian journal of physical chemistry. 2015. № 1 (9). P. 43–49.
7. Бобровицкий С.А. Повышение устойчивости процессов горения в камере сгорания ГТД за счет конструктивных доработок камеры сгорания // Инновационные процессы в современном мире (ИННОФОРУМ-2016). Ростов: Фонд науки и образования, 2016. С. 331–332.
8. Егоров М.Ю., Егоров С.М., Егоров Д.М., Мормуль Р.В. Численное моделирование нестационарных и нелинейных внутрикамерных процессов при срабатывании ракетного двигателя на твердом топливе специального назначения Часть 2. Результаты расчетов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 48. С. 26–34.
9. Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Нугманова А.О., Ергалиева А.Б. Численное исследование температурных характеристик камеры сгорания реального энергетического объекта БКЗ 160 // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. № 16. С. 158–162.
10. Белодед О.В., Филипов С.Е. Расчет вибрационного горения в резонаторе Гельмгольца энергетическим методом // IV НПК молодых ученых и специалистов РТ. Казань, 2001. С. 56.
11. Ларионов В.М. Вибрационное горение в энергетических установках типа «емкость–труба» / В.М. Ларионов, С.Е. Филипов, О.В. Белодед // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. № 11–12. С. 64–71.
12. Ларионов В.М., Филипов С.Е., Рукавишников Д.В. Механизмы возбуждения и теоретическая модель вибрационного горения твердого топлива в трубе // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2006. № 1–2. С. 20–28.
13. Larionov V.M., Saifullin E.R., Semenova E.V. Self-excited gas oscillations in Helmholtz resonator type combustor (2016) Journal of Physics: Conference Series, 669 (1).

Авторы публикации

Семенова Евгения Вячеславовна – аспирант Казанского (Приволжского) федерального университета.

Ларионов Виктор Михайлович – д-р техн. наук, профессор Казанского (Приволжского) федерального университета.

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. Carvalho J.A. Behavior of solid particles in pulsating flows // Sound and Vibration. 1995. Vol. 185. P.581–593.
2. Taimarov M. A., Sharipov M. R. pulsed combustion Boiler of natural and pyrolysis gases. Bulletin of Kazan technological University. - 2013. - volume 16 ,21 . - Pp. 133-135.
3. Bida, L. A., Comes, V. D., Levchuk, A. S., Pleshakov, I. G., Polezhaev, Y. V., Roll, I. P., Soloviev, V. N., Fokina, G. I. Vibrating combustion as the prospect of recycling of radiocesium-contaminated wood fuels // journal of Engineering physics. - 2013. - №№ 1. - P. 145-151 .
4. Bokun I. A. Burning low-grade fuels and biomass in pulsating layer // Izv. Higher education institutions and energy associations of the CIS. Energy. - 2013. - №6. - P. 58-64.
5. Filipov S.E. Vibration combustion of solid fuel in a device of the "capacitance-tube" type / S.E. Filipov, V.M. Larionov // Izv. Higher education: Problems of energy. -2004. - № 1-2. - P. 135-138.
6. Novozhilov B. V. Linear analysis of hotspot-pulsating mode of propellant combustion / B. V. Novozhilov // Russian journal of physical chemistry 2015 - №1 (9) P. 43-49
7. Bobrovitsky S. A. increasing the stability of combustion processes in the combustion chamber of the gas turbine engine due to the design improvements of the combustion chamber // Innovative processes in the modern world (INNOFORUM-2016). - Rostov: science and education Fund, 2016. - P. 331-332.
8. Egorov M. Yu., Egorov S. M., Egorov D. M., Mormul R. V. Numerical simulation of non-stationary and nonlinear in-chamber processes in the operation of a rocket engine on solid fuel for special purposes Part 2. Results // Bulletin of Perm national research Polytechnic University aerospace. - 2017. - №48. - P. 26-34.
9. Askarova A. S., Bolegenova S. A., Maksimov V. Yu., Nugmanova A. O., ergalieva A. B. Numerical study of temperature characteristics of the combustion chamber of the real energy object BKZ 160 // Fundamental and applied research: problems and results. - 2014. - №16. - P. 158-162.
10. Beloded O. V., Filipov S. E. calculation of vibration combustion in the Helmholtz resonator by the energy method // IV NPK of young scientists and specialists of RT. Kazan: 2001. - P. 56.
11. Larionov V.M. Vibration combustion in power plants of the "capacitance-tube" type / V.M. Larionov, S.E. Filipov, O.V. Beloded, "Izv. Higher education: Problems of energy. - 2003. - No. 11-12. - P. 64-71.
12. Larionov V.M. Excitation mechanisms and theoretical model of vibrational combustion of solid fuel in a pipe. Larionov, S.E. Filipov, D.V. Rukavishnikov // Izv. Vuzov: Problems of power engineering, 2006. - №1-2. from. 20-28.
13. Larionov V.M., Saifullin E.R., Semenova E.V. Self-excited gas oscillations in Helmholtz resonator type combustor (2016) Journal of Physics: Conference Series, 669 (1), статья № 012047.

Authors of the publication

Evgenia S. Vyacheslavovna – post graduate Kazan Federal University.

Viktor L. Mihailovich – professor Kazan Federal University.

Yuriy V. Vitalevich – professor Kazan State Power Engineering University

Поступила в редакцию

18 мая 2018 г.