

КАЗАНЬТЕ ДИССЕРТАЦИЙ

УДК 534.13

ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ ГАЗА ПРИ ГОРЕНИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В КОАКСИАЛЬНЫХ ТРУБАХ

Е.В. Семенова¹, О.В. Иовлева¹, И.В. Ларионова², Ю.В. Ваньков³

¹Казанский федеральный университет

²Казанский национальный исследовательский технический университет

³Казанский государственный энергетический университет

Резюме: Организация пульсационного режима горения – одно из возможных решений задачи повышения энергоэффективности установок, использующих углеводородное топливо. Для слоевого сжигания твердого топлива, в частности твердых техногенных отходов, перспективными считаются коаксиальные системы, позволяющие обеспечить поступление вторичного воздуха в зону горения. В данной работе проведен анализ собственных колебаний газа в системе коаксиально расположенных труб. Исследовано влияние взаимного расположения камеры сгорания и резонансной трубы на частоты колебаний газа.

Ключевые слова: энергоэффективность, горение, твердое топливо, коаксиальные трубы, частоты колебаний.

Благодарности: Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

FREQUENCIES OF GAS OSCILLATIONS CAUSED BY THE COMBUSTION OF SOLID FUEL IN COAXIAL TUBES

E.V. Semenova¹, O.V. Iovleva¹, I.V. Larionova², Y.V. Van'kov³

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technical University

³Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

Abstract: Organization of pulsating combustion mode is one of the possible solutions to improve energy efficiency installations tasks that use hydrocarbon fuels. For stratified combustion of solid fuels, especially solid waste technogenic promising are coaxial system, allowing to provide secondary air flow to the combustion zone. In this paper, an analysis of its own oscillations of gas in coaxial pipes system. The effect of the mutual arrangement of the combustion chamber and the resonance frequency of the pipe on the gas fluctuations.

Keywords: energy efficiency, combustion, solid fuel coaxial tube vibration frequency.

Acknowledgments: The work is performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University.

В настоящее время вопросы теории колебаний газа, возникающих в установках с горением, по-прежнему актуальны [1–5]. Известно [6, 7], что для интенсификации процесса горения низкосортного топлива, например промышленных и бытовых отходов, используются камеры сгорания типа трубы Рийке. Показано [8], что перспективными являются энергетические установки, включающие две коаксиально расположенные трубы, позволяющие обеспечить подачу вторичного воздуха в зону горения. В работе [9] была разработана математическая модель пульсационного горения твердого топлива в установке, представленной на рис.1. Ее особенностью является то, что она состоит из двух резонаторов, имеющих собственные спектры частот колебаний. В данной работе проводится анализ влияния собственных частот резонаторов и степени их взаимодействия на частоты колебаний газа в системе коаксиально расположенных труб.

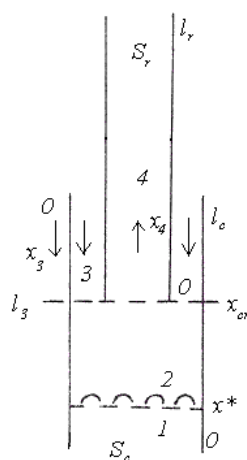


Рис.1. Схема исследуемой установки:

1, 2 – холодная и горячие части камеры сгорания; 3 – кольцевой канал; 4 – резонансная труба

В изучаемой установке рассматриваются четыре участка [9]. Первый – часть камеры сгорания до решётки, удерживающей топливо. Второй участок – область тепловыделения, которая расположена между решёткой и сечением камеры сгорания, до которого введена резонансная труба. Третий участок – кольцевой канал между трубами, по которому подаётся вторичный воздух. Четвёртый участок – резонансная труба, по которой движется горячий газ. Было получено уравнение частот колебаний газа в рассматриваемой установке, которое имеет следующий вид:

$$\frac{S_c}{Y_1} + \frac{S_3}{Y_3} = \frac{S_r}{Y_r}. \quad (1)$$

Мнимые части акустических импедансов выделенных участков определяются соотношениями:

$$Y_1 = \rho_{1,0} c_1 \operatorname{tg}(\omega x^* / c_1 + \varphi_1),$$

$$Y_3 = \rho_{3,0} c_3 \operatorname{tg}(\omega l_3 / c_3 + \varphi_3) ,$$

$$Y_r = \rho_{4,0} c_{4,0} \operatorname{tg}\left(\frac{b_4}{2\omega} + \beta_4 \operatorname{tg} \varphi_4\right) , \quad (2)$$

в которых $\varphi_1 = \frac{\omega \Delta l_c}{c_1}$, $l_c = \frac{\omega \Delta l_3}{c_1}$, $\Delta l_c = 0,61 R_c$, $\varphi_3 = \frac{\omega \Delta l_3}{c_1}$, $\Delta l_3 = 0,61 R_3$, $R_3 = \sqrt{R_c^2 - R_r^2}$,

$$l_r^* = l_r + 0,61 R_r , \quad (3)$$

где ω – циклическая частота; ρ_0 – средняя плотность газа; c_1 – скорость звука в воздухе; $\rho_{4,0}$ и $c_{4,0}$ – средняя плотность газа и скорость звука на входе в резонансную трубу; a_4 и b_4 – коэффициенты распределения скорости звука в резонансной трубе: $c_4 = a_4 - b_4 x_4$, $S = \pi R^2$, индекс «с» соответствует камере сгорания, индекс «г» – резонансной трубе.

Уравнение (1) и соотношения (2), (3) позволяют рассчитать частоты колебаний газа в исследуемой установке с произвольными геометрическими параметрами.

На рис. 2 показаны результаты расчета частот колебаний газа для трубы–камеры сгорания, длиной 1 м и внутренним диаметром 55мм. Эти значения и условия расчета были такими же, как в работах [6, 10], в которых исследовалось пульсационное горение древесных гранул в трубе, открытой на обоих концах. Резонансная труба имела внутренний диаметр 40 мм.

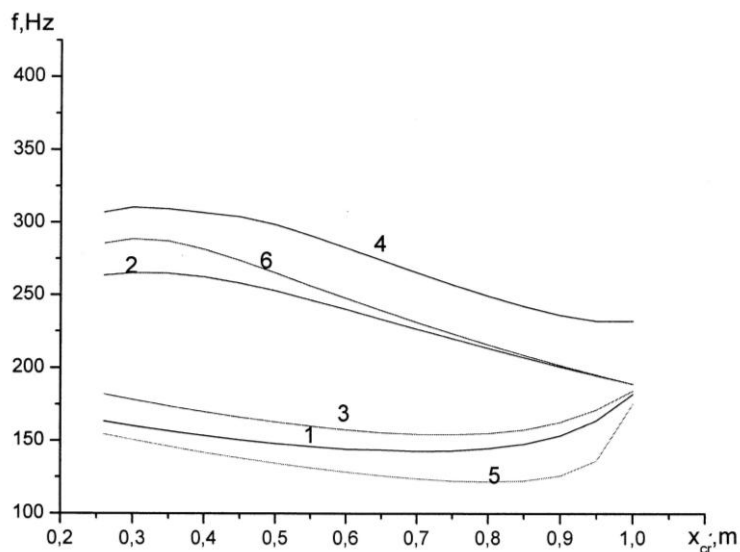


Рис. 2. Частоты колебаний газа в зависимости от положения резонансной трубы и ее длины:

1, 2 – $l_r = 0,95$ м; 3, 4 – $l_r = 0,75$ м; 5, 6 – $l_r = 1,15$ м

Вычисления показали, что в резонансной трубе длиной 0,95 м, открытой на обоих концах, частота колебаний газа такая же, как в трубе–камере сгорания в случае, когда

резонансная труба полностью выведена и горение топлива происходит на расстоянии $x^* = l/4$ от нижнего конца. Это значение равно 186 Гц. Введение резонансной трубы приводит к раздвоению частоты колебаний (рис. 2, кривые 1, 2). Глубина ввода оценивалась по расстоянию $x_{c,r}$ входного сечения резонансной трубы до нижнего конца трубы–камеры сгорания. При перемещении резонансной трубы вглубь камеры сгорания интервал между частотами колебаний системы двух труб расширяется. Характерным является то, что одна из частот f_1 всегда меньше, а вторая f_2 всегда больше собственной частоты каждой из труб в отсутствии взаимодействия. Если длина резонансной трубы равна 0,75 м, то ее собственная частота (рис. 2, кривая 4) выше собственной частоты камеры сгорания (рис. 2, кривая 3). Для резонансной трубы длиной 1,15 м собственная частота (рис. 2, кривая 5), ниже собственной частоты камеры сгорания (рис. 2, кривая 6). Однако какова бы ни была длина резонансной трубы, одна из частот системы коаксиальных труб всегда ниже, а вторая – выше собственных частот труб, в отсутствии взаимодействия.

Были выполнены расчеты для трубы–камеры сгорания той же длины – 1 м, но более широкой, имеющей внутренний диаметр – 0,1 м. Резонансная труба имела диаметр 70 мм. Вычисления показали, что в этом случае собственные частоты трубы–камеры сгорания и резонансной трубы 175 Гц, когда $l_r = 1,01$ м.

Выводы

По результатам исследований пульсационного горения твердого топлива в коаксиальных трубах можно сделать следующие выводы:

1. Одна из частот колебаний газа в системе всегда ниже, а другая – выше частот колебаний в трубах, при отсутствии взаимодействия.
2. Перемещение резонансной трубы вглубь камеры сгорания усиливает их акустическое взаимодействие и расширяет интервал между частотами системы.

Литература

1. Iovleva O.V. Conditions for exciting the maximal gas vibration amplitude in a combustion chamber of the Helmholtz resonator type / O.V. Iovleva, V.M. Larionov // Russian Aeronautics. – 2012. - №55 (4). - PP. 388-391.
2. Durox D. Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control / D. Durox, J.P. Moeck, J.F. Bourguin, T. Schuller, S. Candel, P. Morenton, M. Viallon // Combust. Flame. – 2013. – № 160.
3. Hernández I. LES and acoustic analysis of thermo-acoustic instabilities in a partially premixed model combustor / I. Hernández, G. Staffelbach, T. Poinsot, J. C. Casado, J. W. B. Kok // Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Séries II, Mécanique. – 2013. - vol. 341. - PP. 121-130.
4. Секундов А. Н. Сопоставление результатов моделирования полей СО на фронте пламени на основе методов RANS и LES / А. Н. Секундов, С. А. Чепрасов, К. Я. Якубовский // ТБТ. 2015. Том 53, № 5. С. 1–5.
5. Cheprasov S. Numerical simulation of the ONERA/LAERTA step burner / S. Cheprasov, A.M. Starik, S.M. Frolov // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Combustion and Its Application Moscow: TORUS PRESS. - 2016. - PP. 195-203.

6. Ларионов В.М. Автоколебания газа в установках с горением / В.М. Ларионов, Р.Г. Зарипов // Казань: Изд-во Казан. гос. технич. ун-та, 2003. С.237.
7. Carvalho J.A. Behavior of solid particles in pulsating flows / J.A. Carvalho // Sound and Vibration. – 1995. – Vol. 185. – P.581–593.
8. Павлов Г.И. Исследование физических принципов слоевого горения в коаксиальной КВГ / Г.И. Павлов, Р.Ф. Шакуров // Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева. 2003. №2. С. 24–36.
9. Ларионов В.М. Математическая модель автоколебаний газа при горении твердого топлива в коаксиальных трубах / В.М. Ларионов, Е.В. Яллина, О.В. Иовлева // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. № 3-4. С. 3–14.
10. Филипов С.Е. Механизмы возбуждения и теоретическая модель вибрационного горения твердого топлива в трубе / С.Е. Филипов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2006. № 1-2. С. 20 – 28.

Авторы публикации

Семенова Евгения Вячеславовна – аспирант кафедры «Техническая физика и энергетика» Казанского федерального университета (КФУ). E-mail: evgeniya.yallina@gmail.com.

Иовлева Ольга Вячеславовна – доцент кафедры «Техническая физика и энергетика» Казанского федерального университета (КФУ).

Ларионова Ирина Викторовна – доцент Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ).

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

References

1. Iovleva O.V. Conditions for exciting the maximal gas vibration amplitude in a combustion chamber of the Helmholtz resonator type / O.V. Iovleva, V.M. Larionov // Russian Aeronautics. – 2012. - №55 (4). - PP. 388-391.
2. Durox D. Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control / D. Durox, J.P. Moeck, J.F. Bourguin, T. Schuller, S. Candel, P. Morenton, M. Viallon // Combust. Flame. – 2013. – № 160.
3. Hernández I. LES and acoustic analysis of thermo-acoustic instabilities in a partially premixed model combustor / I. Hernández, G. Staffelbach, T. Poinso, J. C. Casado, J. W. B. Kok // Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Séries II, Mécanique. – 2013. - vol. 341. - PP. 121-130.
4. Sekundov A. N. Sopostavlenie rezultatov modelirovaniya poley SO na fronte plameni na osnove metodov RANS i LES / A. N. Sekundov, S. A. Cheprasov, K. Ya. Yakubovskiy // TVT. - 2015. - tom 53. - № 5. - PP. 1–5.
5. Cheprasov S. Numerical simulation of the ONERA/LAERTA step burner / S. Cheprasov, A.M. Starik, S.M. Frolov // Nonequilibrium processes in physics and chemistry. Combustion and Its Application Moscow: TORUS PRESS. - 2016. - PP. 195-203.
6. Larionov, V.M. Self-oscillations of gas in the combustion installations. [Text]/ V.M Larionov, R.G. Zaripov // Kazan: Publishing house of Kazan Staty Technical University.- 2003. –P.237.

7. Carvalho J.A. Behavior of solid particles in pulsating flows / J.A. Carvalho // Sound and Vibration. – 1995. – Vol. 185. – P.581–593.
8. Pavlov, G.I. Investigation of the physical principles of layer burning in the coaxial CVG. [Text]/ G.I. Pavlov, R.F. Shakurov // Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva. -.2003. -№2.-P.24–36.
9. Larionov, V.M. The mathematical model of oscillation of gas during combustion of solid fuels in coaxial tubes / Larionov V.M., Yallina E.V., Iovleva O.V.// Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. - 2014. -3-4. P. 3-14.
10. Filippov S.E. Mechanisms of excitation and the theoretical model of a vibrating solid fuel combustion in the pipe / S.E. Filippov. and other. // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2006. № 1-2. P. 20-28.

Authors of the publication

Semenova Evgenia Vyacheslavovna – post graduate Kazan Federal University.

Iovleva Olga Vyacheslavovna – assistant professor Kazan Federal University.

Larionova Irina Viktorovna – assistant professor Kazan National Research Technical University.

Vankov Yuriy Vitalevich – professor Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

06 декабря 2016 г.