

РОЗДІЛ «ТЕПЛОТЕХНІКА. ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА»

УДК 532.542.86.(088.8)

ГОЦУЛЕНКО В.В., к.т.н., ст. науч. сотр.
ГОЦУЛЕНКО В.Н.*, к.т.н., доцентИнститут технической теплофизики НАН Украины
*Институт предпринимательства «Стратегия»АВТОКОЛЕБАНИЯ ПОЮЩЕГО ПЛАМЕНИ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ
ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ГАЗА, КОГДА ПОДВОД
ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ОСУЩЕСТВЛЯЕТСЯ ПОД РАЗРЕЖЕНИЕМ

Введение. В монографии [1] приведено условие возбуждения акустических автоколебаний, которое заключается в положительности потока акустической энергии $A > 0$. Цепочка эквивалентных неравенств этого условия [2] определяет механизмы автоколебаний, наблюдаемых при преобразовании различных видов энергии в напор потока жидкости или газа. Механизмы отрицательных сопротивлений [3], которые являются причиной возбуждения автоколебаний во многих явлениях при преобразовании теплоты, подводимой как конвективно, так и выделяемой при сгорании, были обоснованы в [4-6]. Из-за отрицательных сопротивлений вязкостного $h_v(Q_t)$ по длине [5] и теплового $h_T(Q_t)$ [6] образуется восходящая ветвь на напорной характеристике теплоподвода $F(Q_t)$, которая обуславливает необходимое условие неустойчивости стационарного режима. При вибрационном горении автоколебания возбуждаются также известным механизмом запаздывания сгорания топлива, предложенным Л.Крокко. Снижение температуры продуктов сгорания из-за изменения соотношения компонентов топлива с возрастанием его расхода приводит к возбуждению энтропийных волн в камере сгорания [1], а теплоотвод от нагретого газа является причиной колебаний Рисса [7].

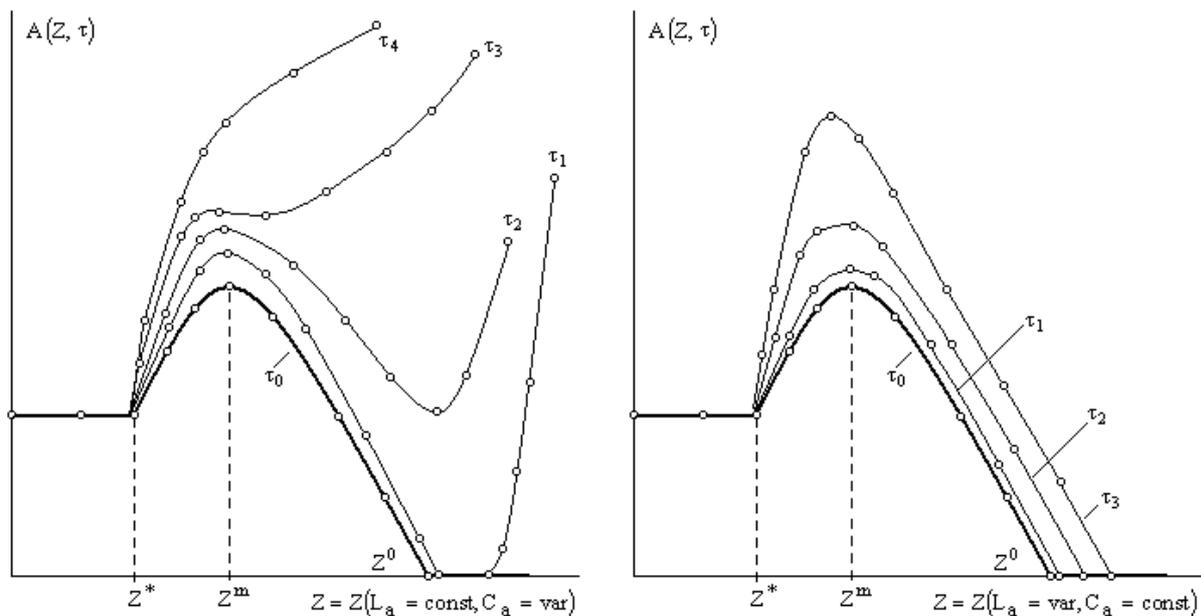


Рисунок 1 – Зависимости амплитуды автоколебаний $A(Z, \tau)$ при различных запаздываниях $\tau : 0 = \tau_0 < \tau_1 < \tau_2 < \tau_3 < \tau_4$

Согласно [8], независящая от волнового сопротивления $Z : Z \leq Z^*$ колебательного контура амплитуда релаксационных автоколебаний (рис.1) поющего пламени при сгорании газообразного топлива не изменяется также и с увеличением запаздывания τ сгорания топлива. Амплитуда рассматриваемых автоколебаний возрастает с увеличением тепловой нагрузки [5]. Известно, что повышение тепловой нагрузки в вертикальных камерах горения доменных печей значительно улучшает их экономические показатели, но при этом самовозбуждаются автоколебания вибрационного горения, амплитуда которых является разрушительной для конструкции камеры горения [9].

Постановка задачи. Задачей данной работы является обоснование устойчивости стационарного режима горения при любых значениях времени запаздывания сгорания топлива, осуществляемого в вертикальной камере горения под разрежением, когда ее напорная характеристика $F(Q_t)$ является монотонно убывающей функцией расхода продуктов сгорания. В этом случае отсутствует отрицательное тепловое сопротивление, т.е. когда выполняется неравенство $dF/dQ_t \leq 0$, единственным механизмом неустойчивости является время запаздывания сгорания топлива (механизм Л.Крокко), которое в этом случае автоколебания не возбуждает.

Результаты работы. Математическая модель. Автоколебания поющего пламени при сгорании газообразного топлива под разрежением рассматриваются в устройстве (рис.2), в котором разрежение создается дымососом, перемещающим продукты сгорания.

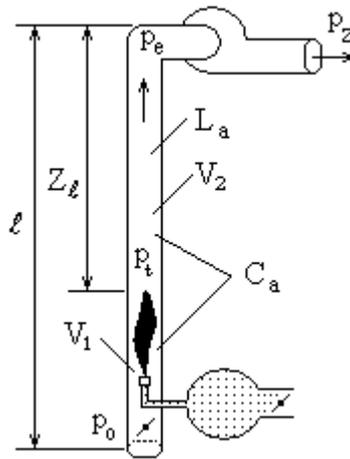


Рисунок 2 – Схема модели устройства, осуществляющего явление поющего пламени под разрежением

В рассматриваемой системе с дискретными параметрами (рис.2), уравнение движения дыма, согласно [9], может быть записано в следующей форме:

$$L_a dQ_t/dt = p_t - h_T(Q_t) - h_\ell(Q_t) - \rho_t g Z_\ell - p_e,$$

где L_a – акустическая масса [10]; $h_T(Q_t)$ и $h_\ell(Q_t)$ – соответственно тепловые и гидравлические (вязкостные) потери по длине проточного тракта потери давления; $\rho_t g Z_\ell$ – напряжение силы тяжести столба нагретого дыма. Воспользовавшись уравнениями $p_Z + \rho_0 g Z_\ell = p_0$ и $p_Z = p_e + H_d(Q_t)$, где $H_d(Q_t)$ – напорная характеристика дымососа, уравнение движения окончательно запишем в виде [10]

$$L_a dQ_t/dt = F(Q_t) - P, \tag{1}$$

где $F(Q_t) = H_d(Q_t) + A(Q_t) - h_t(Q_t) - h_\ell(Q_t)$ – напорная характеристика теплоподвода вертикальной камеры горения; $A(Q_t)$ – давление подъемной силы и $P = p_0 - p_t$.

Построение напорной характеристики преобразования теплоты в напор потока $F(Q_t)$ рассмотрено в [11].

Уравнение, выражающее закон сохранения массы, для вертикальной камеры горения (рис.2) запишем в виде [12]: $dM = dM_1 + dM_2$, где dM_1 – изменение массы холодного воздуха в объеме трубы V_1 и dM_2 – изменение массы дыма, образовавшегося после сгорания топлива, в объеме трубы V_2 . Учитывая, что

$$dM = (\rho_0 Q_{\text{вх}} - \rho_t Q_t) dt, \quad (2)$$

где $Q_{\text{вх}}$ и Q_t – соответственно объемные расходы воздуха при температуре T_0 , входящего в трубу, и дыма при температуре T после сгорания топлива на выходе из трубы.

Используя соотношения $dM_1 = V_1 d\rho_0$ и $dM_2 = V_2 d\rho_t$, уравнение (2) запишем в виде

$$\frac{V_1}{\rho_t} \frac{d\rho_0}{dt} + \frac{V_2}{\rho_t} \frac{d\rho_t}{dt} = \frac{\rho_0}{\rho_t} Q_{\text{вх}}(t - \tau) - Q_t(t). \quad (3)$$

Затем, используя формулы $dp_t/d\rho_0 = c_0^2$ и $dp_t/d\rho_t = c_t^2$, определяющие величины скорости звука в объемах вертикальной трубы V_1 и V_2 соответственно при температурах T_0 и T , и учитывая, что $dp_t = -dP$, уравнение (3) запишем в форме [10]

$$C_a dP/dt = Q_t - \varphi[P(t - \tau)], \quad (4)$$

в котором $C_a = C_{a_1} + C_{a_2}$, $C_{a_1} = \frac{V_1}{\rho_t c_0^2}$, $C_{a_2} = \frac{V_2}{\rho_t c_t^2}$, а обращение функции $\varphi(P)$ опре-

деляет зависимость гидروطерь в трубе перед сгоранием $P = k_{\text{др}} Q_{\text{вх}}^2$, где $k_{\text{др}}$ – коэффициент гидравлических потерь на входе в камеру горения.

Из-за разрежения в вертикальной трубе (рис.2) выполняется соотношение $dp_t = -dP$, в результате которого в уравнении (3) слагаемые, представляющие расходы $Q_{\text{вх}}$ и Q_t , поменялись местами, что определяет структуру уравнения (4) и отражает особенность влияния запаздывания на автоколебания поющего пламени в рассматриваемой установке (рис.2), которая в [13] оставалась неизвестной.

Полученная динамическая система (1), (4) является системой с запаздывающим аргументом. Для построения ее фазовых траекторий воспользуемся адаптированным для дифференциально-разностных уравнений методом Эйлера с переменным шагом [14]. Однако удобно предварительно перейти к безразмерным переменным, полагая

$$x = Q_t/Q_t^*, \quad y = P/P^*, \quad t' = t/m_t, \quad \tau' = \tau/m_t, \quad (5)$$

где m_t – характерный масштаб времени (например $m_t = 1$ с), а параметры стационарного режима Q_t^* и P^* определяются из условий:

$$\left. \frac{dQ_t}{dt} \right|_{Q_t=Q_t^*} = 0, \quad \left. \frac{dP}{dt} \right|_{P=P^*} = 0 \Leftrightarrow P^* = F(Q_t^*), \quad Q_t^* = \sqrt{\frac{P^*}{k_{\text{др}}}}. \quad (6)$$

В безразмерных переменных (5) динамическая система (1), (4) запишется в виде:

$$\left[\frac{L_a Q_t^*}{m_t P^*} \right] \frac{dx}{dt'} = \tilde{F}(x) - y, \quad \left[\frac{C_a P^*}{m_t Q_t^*} \right] \frac{dy}{dt'} = x - \sqrt{y(t' - \tau')}, \quad (7)$$

где $\tilde{F}(x) = F(Q_t^* x) / F(Q_t^*)$ – безразмерная напорная характеристика теплоподвода вертикальной камеры горения.

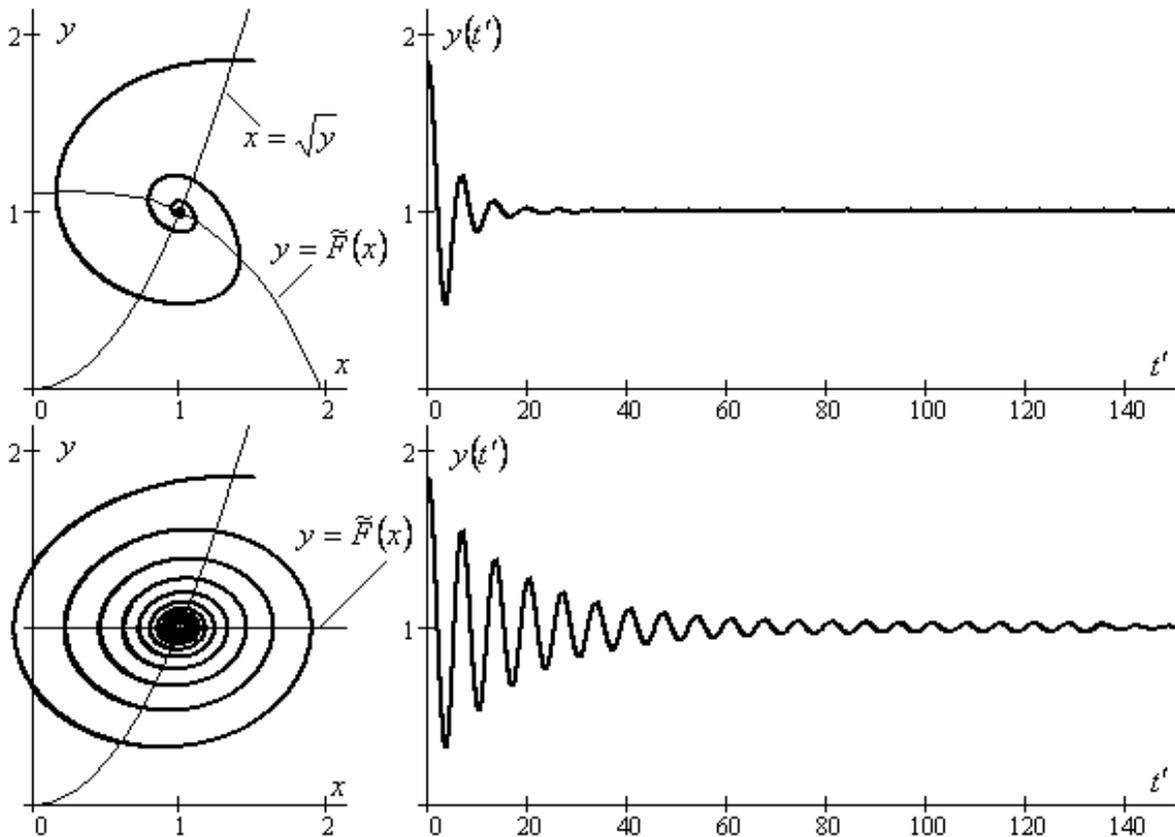


Рисунок 3 – Решение системы уравнений (7) при $\tau' \neq 0$, иллюстрирующее устойчивость стационарного режима горения под разрежением

Проведенный анализ динамической системы (7) показал (рис.3), что теплоподвод под разрежением в случае монотонно убывающей напорной характеристики $F(Q_t)$ полностью исключает возбуждение автоколебаний, обусловленных запаздыванием τ сгорания, которое составляет механизм Л.Крокко вибрационного горения. Если напорная характеристика $F(Q_t)$ седлообразная, то с увеличением тепловой нагрузки возрастает амплитуда как релаксационных, так и гармонических и близких к ним автоколебаний [5, 8].

Выводы.

1. Теоретически установлено, что при седлообразной напорной характеристике теплоподвода $F(Q_t)$ не зависящий от волнового сопротивления Z предельный цикл релаксационных автоколебаний при сгорании под разрежением не зависит также от запаздывания τ сгорания и увеличивается при повышении тепловой нагрузки. С ростом

Z релаксационные автоколебания переходят в гармонические, амплитуда которых возрастает с увеличением запаздывания τ (рис.1).

2. Автоколебания поющего пламени в вертикальной трубе, когда напорная характеристика теплоподвода $F(Q_t)$ является монотонно убывающей функцией, механизмом запаздывания Л.Крокко под разрежением не возбуждаются.

3. При напорном теплоподводе амплитуда автоколебаний поющего пламени определяется следующими механизмами неустойчивости: запаздыванием сгорания и отрицательными гидравлическим и тепловым сопротивлениями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение / Раушенбах Б.В. – М.: Физматгиз, 1961. – 500с.
2. Гоцуленко В.В. К проблеме снижения автоколебаний вибрационного горения / В.В.Гоцуленко, В.Н.Гоцуленко // ИФЖ. – 2012. – Т. 85, № 1. – С.132-138.
3. Харкевич А.А. Автоколебания / А.А.Харкевич. – М.: Гостехиздат, 1954. – 172с.
4. Гоцуленко В.В. Об аналогии нестационарных режимов воздухонагревателя доменной печи (каупера) и трубы Рийке / В.В.Гоцуленко // Системные технологии. – 1999. – № 8. – С.24-26.
5. Гоцуленко В.В. Математическое моделирование особенностей феномена Рийке при изменении мощности теплового потока / В.В.Гоцуленко // Математическое моделирование: РАН. – 2004. – Т. 16, № 9. – С.23-28.
6. Гоцуленко В.В. Тепловое сопротивление как механизм возбуждения автоколебаний / В.В.Гоцуленко, В.Н.Гоцуленко // Сборник научных трудов Днепродзержинского гос. техн. ун-та. – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2009. – Вып. 1(11). – С.95-100.
7. Гоцуленко В.В. Автоколебания явления Рисса, обусловленные теплоотводом от потока нагретого газа / В.В.Гоцуленко, В.Н.Гоцуленко // Математическое моделирование. – 2010. – № 2 (23). – С.33-37.
8. Басок Б.И. Управление автоколебаниями, возбуждаемыми теплоподводом / Б.И.Басок, В.В.Гоцуленко, В.Н.Гоцуленко // Промышленная теплотехника. – 2011. –Т.33, № 4. – С.63-69.
9. Зукер Д. Пульсация давления в воздухонагревателях / Д.Зукер, П.Глас, Г.Бенеке // Черные металлы. – 1980. – № 22. – С.20-26.
10. Казакевич В.В. Автоколебания (помпаж) в компрессорах: моногр. / В.В.Казакевич. – М.: Машиностроение, 1974. – 264с.
11. Басок Б.И. Теория феномена Рийке в системе с сосредоточенными параметрами/ Б.И.Басок, В.В.Гоцуленко // Акустический вестник. – 2010. – Т.13, № 3. – С.3-8.
12. Гоцуленко В.В. Автоколебания в трубе Рийке при ее собственном волновом сопротивлении / В.В.Гоцуленко // Системные технологии. – 2004. – № 4'(33). – С.45-51.
13. Неймарк Ю.И. Об условиях возбуждения поющего пламени / Ю.И.Неймарк, Г.В.Аронович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1955. – Т.28. – С.567-578.
14. Гоцуленко В.В. Об одном численном методе интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом / В.В.Гоцуленко // Математическое моделирование. – 2004. – № 2(12). – С.5-7.

Поступила в редколлегию 17.09.2012.