

Динамика внутрикамерных процессов в аппаратах пульсирующего горения с аэродинамическим клапаном

При наложении ряда допущений сложные нестационарные процессы в аппаратах пульсирующего горения (АПГ) могут быть описаны с приемлемой точностью. Так, в условиях устойчивого автоколебательного режима работы параметры продуктов сгорания в камере зависят, в первую очередь, от подачи исходных компонентов – горючего и окислителя. При этом горючее подается в камеру сгорания, чаще всего, принудительно и непрерывно под давлением, а окислитель (воздух) поступает периодически. Количество воздуха, поступающего через аэродинамический клапан АПГ, зависит от его геометрических размеров, способа соединения с камерой сгорания, параметров инерционного истечения продуктов сгорания по газовому тракту (резонансной трубе) значительной длины. Однако в АПГ с аэродинамическим клапаном расход воздуха G_o определяется средним расходом G_c , всегда направленным из окружающей среды через клапан внутрь камеры сгорания, и пульсирующей знакопеременной составляющей расхода с амплитудой G_n [1]:

$$G_o = G_c + G_n \sin(\omega\tau). \quad (1)$$

Для вывода уравнения динамики камеры сгорания АПГ примем следующие основные допущения. Будем считать, что используется газообразное горючее и лимитирующей стадией при образовании продуктов сгорания из исходных реагентов является время их смешения. Причем стадия смешения происходит несоизмеримо быстрее рабочего времени цикла АПГ. Следовательно, не учитывается время запаздывания. Примем также продукты сгорания идеальным газом и не будем учитывать возможное изменение расхода горючего G_r вследствие повышения или понижения внутрикамерного давления в условиях пульсирующего горения.

Уравнение баланса массы в камере сгорания АПГ в любой момент времени можно представить в виде [2]:

$$\frac{dm}{d\tau} = (G_o + G_r) - G_{nc}, \quad (2)$$

т.е. скорость накопления массы m газообразных продуктов сгорания определяется разностью между массовым приходом исходных компонентов ($G_o + G_r$) и расходом продуктов сгорания G_{nc} на выходе из АПГ.

Массу газообразных продуктов сгорания в выражении (2) можно определить из уравнения состояния идеального газа, т.е. в общепринятых обозначениях получим

$$m = \frac{pV}{RT},$$

где RT – работоспособность продуктов сгорания, зависящая от вида используемого топлива, массового соотношения окислитель/горючее ($k_m = G_o/G_r$) и давления p .

Считая постоянным объем V , можно найти производную $\frac{dm}{d\tau}$:

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{V}{RT} \frac{dp}{d\tau} - \frac{V}{(RT)^2} \frac{d(RT)}{d\tau} p. \quad (3)$$

Работоспособность продуктов сгорания RT является функцией массового коэффициента соотношения компонентов топлива k_m и давления, поэтому величину производной в правой части выражения (3) можно найти следующим образом:

$$\frac{d(RT)}{d\tau} = \left(\frac{\partial(RT)}{\partial p} \right)_{k_m} \frac{dp}{d\tau} + \left(\frac{\partial(RT)}{\partial k_m} \right)_p \frac{dk_m}{d\tau}. \quad (4)$$

Для определения входящих в уравнение (4) частных производных $\left(\frac{\partial(RT)}{\partial p} \right)_{k_m}$ и $\left(\frac{\partial(RT)}{\partial k_m} \right)_p$ необходимо знать функцию $RT = f(k_m, p)$. Для большинства топливных комбинаций величина RT слабо зависит от давления, особенно в области обедненных смесей, на которых наиболее часто эксплуатируются АПГ. Поэтому можно принять $\left(\frac{\partial(RT)}{\partial p} \right)_{k_m} = 0$. В свою очередь, зависимость работоспособности продуктов сгорания от массового соотношения компонентов топлива k_m при фиксированном давлении в области с избытком окислителя в прак-

тических целях можно аппроксимировать прямой линией. Следовательно, частную производную $\left(\frac{\partial(RT)}{\partial k_m}\right)_p$

можно считать постоянной для заданного вида топлива.

С учетом уравнения (1) и сделанных допущений производная от k_m по времени

$$\frac{dk_m}{d\tau} = \frac{1}{G_r} \frac{dG_o}{d\tau} = \frac{G_n \omega \cos(\omega\tau)}{G_r}. \quad (5)$$

Поскольку средний массовый расход продуктов сгорания $G_{пс}$ есть сумма среднего расхода окислителя G_c и большей части горючего, обеспечивающей среднее массовое соотношение компонентов, то скорость накопления массы m газообразных продуктов в любой момент времени внутри камеры сгорания будет зависеть, в первую очередь, от нестационарной составляющей расхода окислителя G_o . При увеличении расхода за счет нестационарного потока окислителя продукты сгорания, образованные из предыдущей порции пульсирующей составляющей расхода окислителя, также ускоренно покидают камеру сгорания. Их накопление возможно лишь при замедлении скорости поступления массы окислителя. Математически это означает, что накопление массы сдвинуто на фазовый угол $\pi/2$. Таким образом, в правой части выражения (2) остается член $G_n \sin(\omega\tau + \pi/2)$.

Комбинируя выражения (3) – (5), с учетом сделанных заключений можно получить дифференциальное уравнение камеры сгорания АПГ в виде:

$$\frac{V}{RT} \frac{dp}{d\tau} - \frac{pV}{(RT)^2} \left(\frac{\partial(RT)}{\partial k_m}\right)_p \frac{G_n \omega \cos(\omega\tau)}{G_r} = G_n \sin\left(\omega\tau + \frac{\pi}{2}\right). \quad (6)$$

Численное интегрирование нелинейного дифференциального уравнения (6) с учетом начального условия $p(0) = p_a$ (p_a – атмосферное давление) позволяет установить закон изменения давления в камере сгорания АПГ в условиях устойчивого пульсирующего горения. На рис. 1 представлена зависимость изменения давления в двадцатикиловаттном АПГ с аэродинамическим клапаном при работе на природном газе при следующих характеристиках: $RT = 292,4 \cdot 1142$ Дж/кг; $k_m = 51,54$ ($\alpha = 3$); $V = 6,659 \cdot 10^{-4}$ м³; $G_r = 5,7 \cdot 10^{-4}$ кг/с; $G_c = 0,0294$ кг/с; $\partial(RT)/\partial k_m = -6653$; $G_n = 0,02$ кг/с; $\omega = 930$ рад/с ($\nu = 148$ Гц, $T = 0,0068$ с).

Анализ полученного выражения для устройств пульсирующего горения с большей тепловой мощностью показывает, что при увеличении габаритов камеры сгорания и снижении рабочей частоты возможен незначительный рост амплитуды давления. Кроме этого, во всех случаях наблюдается небольшое смещение величины среднего давления внутри камеры в положительную сторону (несимметричные ветви относительно p_a).

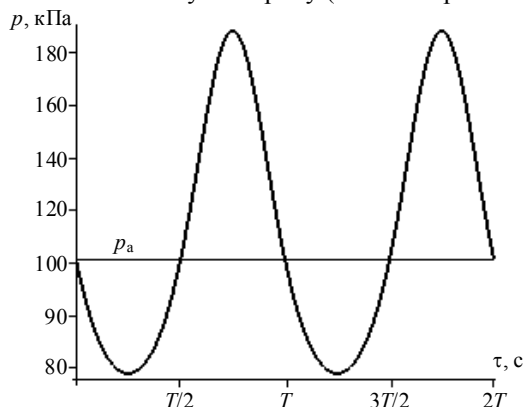


Рис. 1 Расчетная зависимость изменения давления в камере сгорания

Величина амплитуды давления, определенная из уравнения (6), достаточно точно соответствует расчетному значению, полученному по известной формуле В.С. Северянина [3]:

$$\Delta p = \frac{RqG_r}{V\nu c_v}, \quad (7)$$

где q – теплотворная способность топлива; ν – частота пульсаций; c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме. В вышеприведенном примере для АПГ с мощностью 20 кВт амплитуда давления составляет 87,53 кПа, а расчеты по выражению (7) дают величину 88,05 кПа при $q = 48\,782$ кДж/кг и $c_v = 0,9337$ кДж/(кг·К). При этом ценность полученного дифференциального уравнения (6) заключается в возможности проследить внутрикамерную динамику в процессе работы АПГ.

Список литературы

1 Северянин, В.С. Особенности аэродинамики устройств пульсирующего горения [Текст] / В.С. Северянин // Научные и прикладные проблемы энергетики : сб. науч. тр. Минск : Вышейшая школа, 1978. Вып. 5. С. 25 – 29.

2 Махин, В.А. Динамика жидкостных ракетных двигателей [Текст] / В.А. Махин, В.Ф. Присняков, Н.П. Белик. М. : Машиностроение, 1969. 834 с.

3 Северянин, В.С. Оценка амплитуды давления при пульсирующем горении / В.С. Северянин, В.М. Яцкевич // Изв. вузов. Сер. Энергетика. 1983. № 2. С. 96 – 98.