УДК: 519.63 - 631.365

А.А. ДЬЯЧКОВ, студент-бакалавр (ТюмГНГУ)
В.Р. ИСХАКОВ, студент-бакалавр (ТюмГНГУ)
Д.А. БОРДОДЫМОВ, студент-бакалавр (ТюмГНГУ)

г. Тюмень

РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В АППАРАТАХ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

Аппараты пульсирующего горения (АПГ) широко используются по целому ряду причин: экономия топлива, достаточно высокие экологические характеристики, создание ударной волны, обеспечивающей движение объекта и целый ряд других достоинств.

Особенность АПГ состоит в том, что горючая смесь подается не постоянно, а циклически. Цикличность связана с изменением давления, которое закрывает или открывает клапан поступления горючей смеси, в зависимости от достигаемых значений.

Один такт работы АПГ включает в себя следующие операции:

1) подачу горючей смеси;

2) воспламенение;

3) повышение давления до критического;

4) закрытие клапана поступления горючей смеси;

5)дальнейшее горение, при котором происходит выгорание топлива;

6) создание области между стенкой камеры сгорания и фронтом пламени, в котором скапливаются продукты сгорания;

7) полное выгорание топлива и понижение давления, которое открывает клапаны горючей смеси и процесс повторяется.

Предлагается математическая модель одного такта горения горючей смеси в камере сгорания АПГ. Камера сгорания представляет собой цилиндр, окруженный водяной рубашкой охлаждения. Поступление топлива происходит по всей плоскости левой стенки цилиндра.

Предложенная модель описывает изменения температуры в различных средах (газе, воде, стенках), движения жидкости и горючей смеси в газе, изменение в них давления, определение скорости движения фронта пламени.

Расчет представлен в безразмерных координатах, переход к которым осуществлялся последующим масштабным коэффициентам:

$$u = \frac{UR_2}{V_{ж}};\ \vartheta = \frac{VR_2}{V_{ж}};\ \theta = \frac{T - T0}{\Delta T};\ r = \frac{R}{R_2};\ z = \frac{z}{R_2};\quad \tau = \frac{t \cdot v_{ж}}{R_2^2};\ \rho = \frac{\rho \cdot R_2^2}{\rho_{ж} \cdot v_{ж}^2} \qquad (1)$$

Где характерный перепад температур (К).

$$\Delta T = \frac{q \cdot R_2}{\lambda_{ж}}$$

Для жидкости основные уравнения принимают следующий вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u\frac{\partial \theta}{\partial r} + v\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{\rho r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}\right) + \frac{Nu}{\rho r} l_{безр}\theta \qquad (2)$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial v}{\partial \tau} + u\dfrac{\partial v}{\partial r} + v\dfrac{\partial v}{\partial z} = -\dfrac{\partial P_{безр}}{\partial z} + \nu_{ж}\left(\dfrac{1}{r}\dfrac{\partial v}{\partial r} + u\dfrac{\partial v}{\partial r^2} + v\dfrac{\partial v}{\partial z^2}\right) + N \\ \dfrac{\partial u}{\partial \tau} + u\dfrac{\partial u}{\partial r} + v\dfrac{\partial u}{\partial z} = -\dfrac{\partial P_{безр}}{\partial r} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2} + Gr\left(\theta_{ж} - \theta_0\right) \end{cases} \qquad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{r} = 0 \qquad (4)$$

где Pr - критерий Прандтля, Gr - критерий Грасгофа, Nu - число Нуссельта, N- движущая сила.

Приведем уравнение Пуассона для давления в жидкости. В результате получим уравнение вида:

$$\nabla^2 \rho = -\left(\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + 2\frac{\partial u}{\partial r}\cdot\frac{\partial v}{\partial z} + u\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + u\frac{\partial^2 v}{\partial z \partial r} + \frac{u}{r}\frac{\partial u}{\partial r} - \frac{1}{r^2}\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r^2} + Gr\frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r}Gr\theta\right) \qquad (5)$$

Процесс горения происходит в камере сгорания. Рассмотрим в этой области систему уравнений для нахождения температуры, давления, скоростей движения в газе, энергии и переменной плотности. В безразмерных координатах она примет вид [1]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u\frac{\partial \theta}{\partial r} + v\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{1}{\rho r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}\right) + \frac{Nu}{\rho r} l_{безр}\theta + \rho \bar{W}(a,T) \qquad (6)$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \upsilon}{\partial \tau} + u\dfrac{\partial \upsilon}{\partial r} + v\dfrac{\partial \upsilon}{\partial z} = -\dfrac{\partial \rho}{\partial r} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \upsilon}{\partial r} + \dfrac{\partial^2 \upsilon}{\partial r^2} + \dfrac{\partial^2 \upsilon}{\partial z^2} + \left(\dfrac{\zeta}{\nu} - \dfrac{1}{3}\right)\left(\dfrac{\partial^2 \upsilon}{\partial r \partial z} + \dfrac{\partial^2 \upsilon}{\partial r^2} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \upsilon}{\partial r} - \dfrac{\upsilon}{r^2}\right) \\ \dfrac{\partial \nu}{\partial \tau} + u\dfrac{\partial \nu}{\partial r} + v\dfrac{\partial \nu}{\partial z} = -\dfrac{\partial \rho}{\partial r} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \nu}{\partial r} + \dfrac{\partial^2 \nu}{\partial r^2} + \dfrac{\partial^2 \nu}{\partial z^2} + \left(\dfrac{\zeta}{\nu} - \dfrac{1}{3}\right)\left(\dfrac{\partial^2 \nu}{\partial z^2} + \dfrac{\partial^2 \nu}{\partial r \partial z} + \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial \nu}{\partial z}\right) \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial r} + \frac{\partial \nu}{\partial z} + \frac{\upsilon}{r} = \mathrm{A}\frac{\partial \rho_{безр}}{\partial \tau} \quad (8)$$

где

$$\mathrm{A} = -\frac{\rho \mathrm{CH}_4}{\rho_\tau},$$

$$\varepsilon \frac{\chi_1}{\nu_1}\left(\rho\frac{\partial a}{\partial \tau} + \rho\upsilon\frac{\partial a}{\partial r} + \rho\nu\frac{\partial a}{\partial z}\right) = \varepsilon^2\left(\frac{\chi_1}{\nu_1}\right)^2 \rho\frac{D}{X_1}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial a}{\partial r} + \frac{\partial^2 a}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 a}{\partial z^2}\right) - \rho W(a,T) \quad (9)$$

Где ε – обратная величина числа Рейнольдса, χ_1 – коэффициент температуропроводности в исходной смеси, ρ – безразмерная плотность, W – безразмерная скорость химической реакции.

Для определения объема сгоревшей массы возьмем уравнение Ван-дер-Вальса состояния реального газа:

$$\left(P + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT \quad (10)$$

Где a, b – постоянные Ван -дер-Вальса, V_m – молярный объем, R – газовая постоянная.

Дополним систему уравнение:

$$\delta Q = F_\Gamma \delta \nu_\Gamma e^{-i\omega\Delta\tau} q, \quad (11)$$

описывающим процесс сгорания [2], где δQ - скорость выделения тепла, $F_г$ - площадь поперечного сечения камеры сгорания, $\delta\nu_г$ - скорость подачи горючего, которая изменяется по гармонической функции:

$$\delta \nu_\Gamma = \left|\delta \nu_\Gamma\right| e^{-i\omega\tau} \quad (12)$$

τ – время попадания в камеру частиц горючего и их сгорания, i – мнимая единица, ω - циклическая частота, q - калорийность единицы объема

горючего.

Скорость тепловыделения прямо пропорциональна массовому расходу горючей смеси, пересекающей фронт пламени:

$$\delta Q = g_f m_f \tag{13}$$

где g_f - теплотворная способность единицы массы топлива, m_f - периодическая составляющая массового расхода.

Функция распространения пламени $\delta Q(\tau)$ связана с функцией выгорания $\psi_m(\tau)$ соотношением:

$$\delta Q(\tau) = q_f \partial m_f \Psi_m(\tau) \tag{14}$$

Тепловое поле в стенках камеры сгорания описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial \tau} = \frac{1}{\mathrm{P}r_{cmi}}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial \theta_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \theta_i}{\partial z^2}\right) \tag{15}$$

$$i = 1,2$$

Система уравнений для всех сред (газ, жидкость и стенки) дополняется начальными и граничными условиями.

Приближенно решая эту систему, описывающую движение горючей смеси в процессе горения, сможем последовательно найти температуру в газе, жидкости и двух стенках, скорость движения газа и жидкости, давление в них, определить скорость движения фронта пламени и его положение относительно оси Z.

Приведем алгоритм этих вычислений:

1) Подставим в уравнения начальные условия для температуры, скорости и давления во всех трех средах - газе, воде и стенках камеры сгорания.

2) Вычислим температуру во всех внутренних точках области для рассматриваемых сред (газ, вода и 2 стенки камеры сгорания).

3) Вычислим значения температуры на границах всех сред.

4) Найдем плотность газа на данный момент времени из уравнения неразрывности.

5) Вычислим давление в газе, для этого будем использовать уравнение состояния реального газа.

6) Вычислим давление в жидкости, пользуясь уравнением Пуассона.

7) Вычислим скорость тепловыделения, скорость распространения фронта пламени и положение данного фронта относительно оси Z.

8) Вычислим проекции скорости (U, V) движения жидкости и горючей смеси в газе;

В результате, если давление в газе не достигло предельного значения, переходим к следующему шагу. Если давление достигло предельного значения, то закрывается клапан, обеспечивающий поступление горючей смеси в камеру сгорания, и происходит перемещение фронта пламени. Создается пространство, в котором происходят химические реакции горения.

Список литературы:

1. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе - Москва: Наука, 1980.
2. Теория топочных процессов / Г. Ф. Кнорре, К. М. Арефьев, А. Г. Блох и др.; под ред. - Г. Ф. Кнорре, И. И. Палеева - Москва, Ленинград: Энергия, 1966.