

## МЕТОД РАСЧЕТА ГОМОГЕННОГО ПРИСТЕНОЧНОГО СЛОЯ ДЛЯ ВНУТРЕННЕГО ОХЛАЖДЕНИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Первышин А.Н., Боровский М.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

В настоящее время для разнообразных технологических процессов, в том числе в струйных технологиях, широко используются камеры сгорания на топливе типа пропан-воздух, работающих преимущественно в стехиометрической области, но с регулированием в широких пределах, как по составу, так и по теплонапряженности. При разработке таких камер сгорания, особенно при ограниченности их поперечных габаритов, целесообразно использовать предварительное смешивание компонентов и подавать в камеру уже перемешанную топливную смесь. Но в этом случае становится невозможной организация охлаждения камеры путем изменения коэффициента избытка окислителя в пристеночном слое, то есть внутреннее охлаждение одним из компонентов. Внешнее охлаждение приводит к усложнению конструкции и увеличению габаритов, что нежелательно. Внутреннее охлаждение стенки камеры гомогенной смесью может быть реализовано при помощи скоростного пристеночного слоя. Такой слой образуется путем подачи смеси со скоростью, исключающей ее горение, на внутреннюю поверхность стенки через пристеночную кольцевую форсуночную щель (рис.1). Завеса, двигаясь по стенке, прогреваясь и постепенно выгорая, образует низкотемпературный пристеночный слой. Необходимо так выбрать скорость и начальную толщину пристеночного слоя, чтобы к концу камеры сгорания он обеспечивал надежное охлаждение с минимальными энергетическими потерями. Тепловой поток, передаваемый от газа в стенку, в общем случае складывается из конвективного и лучистого тепловых потоков.

Из двух составляющих теплового потока приближенно можно считать, что завеса на лучистый поток не оказывает существенного влияния. Хотя для завесы используются многоатомные газы, недостаточно прозрачные для тепловых лучей, толщина их слоя достаточно невелика по сравнению с диаметром камеры сгорания, поэтому для простоты будем считать, что лучистый поток она не уменьшает. Разница пойдет в запас надежности расчета. Наибольшее влияние завеса охлаждения оказывает на конвективный тепловой поток в стенку, который будет определяться в основном температурой и составом газообразных продуктов возле стенки.

Разобьем камеру сгорания длиной  $L$  (рис.1) на  $n$  участков с длинами  $\Delta x_1; \Delta x_2; \dots; \Delta x_i; \dots; \Delta x_n$  [2]. Пусть газ завесы с начальной скоростью

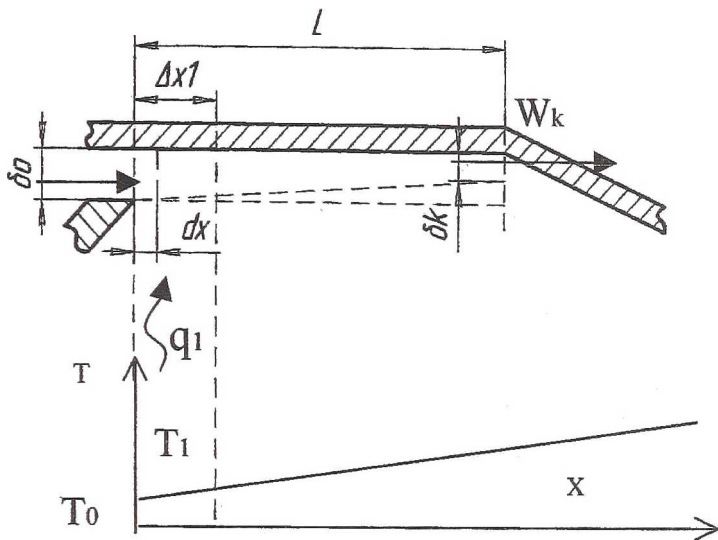


Рис. 1. Модель охлаждения камеры сгорания газогенератора

$W_0$ , через щель  $\delta_0$  поступает к первому участку длиной  $\Delta x_1$ . За единицу времени к элементарному объему газа

$$dV = \left( \frac{\pi d_k^2}{4} - \frac{\pi (d_k - 2\delta_0)^2}{4} \right) dx = \frac{\pi}{4} (2\delta_0 d_k - 4\delta_0^2) dx = \quad (1)$$

$$= \frac{\pi}{2} \delta_0 (d_k - 2\delta_0) dx$$

элементарной массой  $dM = \rho dV = \frac{\pi}{2} \rho \delta_0 (d_k - 2\delta_0) dx$  (2)

через элементарную площадь  $dF = \pi d_k dx$  (3)

поступает элементарное количество энергии в виде тепла

$$dQ = \pi \alpha_k d_k (T_k - T_0) dx. \quad (4)$$

Поскольку газ завесы движется со скоростью  $W_0$ , на расстояние  $dx$  он переместится за время

$$d\tau = \frac{dx}{W_0}. \quad (5)$$

Следовательно, газ в объеме  $dV$  за это время  $d\tau$  нагреется до температуры  $T_0 + dT$

Нагрев происходит за счет конвективного потока  $q_1$ , т.е. энергии в виде тепла  $dQ$  (4).

Предположим, что на стационарном режиме тепло во внешнюю стенку не отводится и она нагрелась до  $[T_{cm}] = T_{cm.2}$ , тогда все тепло  $dQ$  (4) идет на нагрев газа.

$$dQ_1 = C_p dT dm = dQ. \quad (6)$$

На стационарном режиме температура всех точек стенки камеры сгорания не зависит от времени.

Тогда на небольшом участке  $\Delta x$ , к газу за счет конвективного теплообмена будет подведена энергия

$$\Delta Q = \frac{\pi \alpha_k d_k (T_k - T_0) (\Delta x)^2}{W_0}. \quad (7)$$

За счет этого он нагреется, на что уйдет некоторое количество энергии

$$\Delta Q_1 = C_p (T_1 - T_0) \frac{\pi}{2} \rho \delta_0 (d_k - 2\delta_0) \Delta x. \quad (8)$$

Приравнявая (7) и (8), получим

$$\frac{\pi \alpha_k d_k (T_k - T_0) (\Delta x)^2}{W_0} = C_p (T_1 - T_0) \frac{\pi}{2} \rho \delta_0 (d_k - 2\delta_0) \Delta x,$$

где  $T_1 - T_0 = \Delta T_1$ .

Отсюда

$$\Delta T_1 = 2 \frac{\alpha_k d_k (T_k - T_0) \Delta x}{C_p \rho \delta_0 W_0 (d_k - 2\delta_0)}. \quad (9)$$

Будем считать, что скорость завесы не меняется, а диффузия осуществляется только за счет уменьшения толщины пояса завесы  $\delta$ , причем линейно

$$\delta = \delta_0 - k_\delta x, \quad (10)$$

тогда

$$\Delta T_2 = 2 \frac{\alpha_k d_k (T_k - T_1)}{C_{p1} \rho \delta_1 W_0 (d_k - 2\delta_1)} \Delta x_2, \quad (11)$$

где  $\delta_1 = \delta_0 - k_\delta \Delta x_1$ .

Аналогично на третьем участке

$$\Delta T_3 = 2 \frac{\alpha_{k3} d_k (T_k - T_2)}{C_{p2} \rho \delta_2 W_0 (d_k - 2\delta_2)} \Delta x_3,$$

где  $\delta_2 = \delta_0 - k_\delta (\Delta x_1 + \Delta x_2)$ .

Для  $i$ -го участка

$$\Delta T_i = 2 \frac{\alpha_{ki} d_k (T_0 - T_{i-1})}{C_{p_{i-1}} \rho_{i-1} \delta_{i-1} W_0 (d_k - 2\delta_{i-1})} \Delta x_i, \quad (12)$$

где  $\delta_{i-1} = \delta_0 - k_\delta \sum_{j=1}^{i-1} \Delta x_j$ .

Если разбиение равномерное, то есть  $\Delta x_i = \text{const} = \Delta x$ , то выражение (12) упрощается:

$$\Delta T_i = 2 \frac{\alpha_{ki} d_k (T_0 - T_{i-1})}{C_{p_{i-1}} \rho_{i-1} \delta_{i-1} W_0 (d_k - 2\delta_{i-1})} \Delta x, \quad (13)$$

где  $\delta_{i-1} = \delta_0 - k_\delta \sum_{j=1}^{i-1} \Delta x = \delta_0 - k_\delta (i-1) \Delta x$ .

Для оценочных расчетов в первом приближении можно принять теплоемкость смеси  $C_p$ , ее плотность  $\rho$ , толщину пристеночного слоя  $\delta = \text{const}$ , и коэффициент уменьшения пристеночного слоя по длине стенки камеры сгорания  $k_\delta = 0$ .

В принципе, зависимости от температуры  $C_p$ ,  $\rho$  нетрудно учесть, а величиной  $k_\delta$  можно задаваться в пределах от 0 до 1, наблюдая ее влияние на результаты.

Найдем распределение величины коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  по  $x$ . В [1] рекомендуется зависимость

$$Nu = 0,026 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \sigma, \quad (14)$$

где  $\sigma = \frac{1}{\left[ 0,5 \frac{[T_{cm}]}{T_k} \cdot \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) + 0,5 \right]^{0,65} \cdot \left( 1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{0,15}} = \text{const}; \quad (15)$

$$M = \frac{W_0}{a_{3в}}; \quad a_{3в} = \sqrt{k \frac{R\mu}{\mu_{np}} \cdot T_{np}} \quad \text{— для пристенка};$$

$\mu_{np}$  — молярная масса пристеночного газа.

Число Прандтля выбирается по рекомендации [1]  $Pr = 0,75$ ;

$$Re_i = \frac{W_0 \cdot \rho_i \cdot \delta_i}{\mu_i}; \quad (16)$$

$$Nu_i = \frac{\alpha_{ki} \cdot \delta_i}{\lambda_i}. \quad (17)$$

Здесь скорость  $W_0 = \text{const}$ ;  $\rho_i$  – плотность газа в пристенке (при давлении в камере сгорания  $P_k$ ) является функцией от температуры  $T_i$ ;  $\mu_i$  – динамическая вязкость газа в пристенке;  $\lambda_i$  – теплопроводность газа в пристенке.

Значения таких параметров смеси, как динамическая вязкость газа в пристенке и теплопроводность газа в пристенке можно принять для воздуха, так как его намного больше.

Найдя из (14, 15, 16) величины критерия Нуссельта (Nu), можно затем найти величину коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{ki}$  для каждого участка. Одновременно с этим проведем расчет величин перепада температур для каждого участка  $\Delta T_i$ .

Разбиение расчетной модели на участки  $\Delta x$  можно проводить таким образом:

$$\Delta x = \frac{L}{n}, \text{ где } n=10 \dots 20. \quad (18)$$

При проведении оценочного расчета внутреннего охлаждения в первом приближении можно принимать значение коэффициента  $k_s = 0$ , т.е. считать, что толщина завесного слоя не уменьшается в зависимости от расстояния. Проведем оценочный расчет внутреннего охлаждения стенки камеры сгорания газогенератора, реализующего рассматриваемый способ охлаждения, по предложенной методике, выбрав значение  $n = 20$ . Значения теплоемкости, плотности, динамической вязкости и теплопроводности завесного газа принимаем для заданного вида топлива. Внутренний диаметр камеры  $d_k = 0,024$  м, длина  $L = 0,013$  м, начальная температура газа завесы  $T_{пр} = 293$  К, температура в камере  $T_k = 2275$  К, давление в камере сгорания  $P_k = 2,6 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, начальная скорость завесы  $W_0 = 33,4$  м/с. Результаты расчета представлены на рис. 1 (график 1). Определим влияние толщины пристеночного слоя и скорости потока в этом слое на качество охлаждения стенок камеры сгорания. При неизменном расходе газа через пристеночный слой, сначала увеличим в два раза скорость потока у стенки, что можно осуществить, уменьшив площадь кольцевой форсуночной щели в два раза и, естественно, толщину потока (график 2). Затем проведем обратное действие, увеличив от первоначального в два раза толщину пристеночного слоя (график 3).

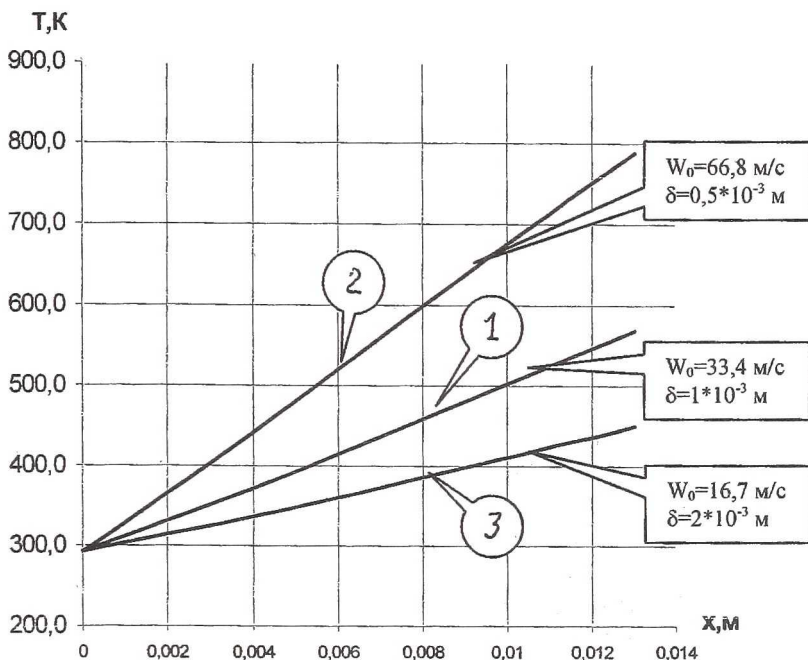


Рис.2. Зависимость температуры пристеночного слоя от длины камеры сгорания

Из результатов расчета видно, что предложенный метод позволяет оценить порядок температур при расчете теплового состояния стенки камеры. При реализации подобного способа охлаждения камеры сгорания главную роль в процессе охлаждения играет толщина пристеночного слоя, а не его скорость, которая должна обеспечивать только невозможность горения газовой смеси в пристенке.

#### Список литературы

1. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей: учебник для студентов авиационных специальностей вузов под ред. Проф. В.М.Кудрявцева – М.: Высшая школа, 1993 – 368 с.
2. Боровский М.А. Организация внутреннего охлаждения камеры сгорания с предварительным смешением компонентов топлива//Сборник научных работ студентов факультета ДЛА СГАУ «Проблемы проектирования, конструирования и производства энергетических установок». - Самара, Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002. – С.32-37.