

Рис. 2. «Бедные» границы срыва пламени при различных значениях параметра  $\bar{q}_v$ ;  
 ----- гомогенная смесь; ———— двухфазная смесь;  
 $T_v = 283\text{K}, T_w = 350\text{K}; P_w = 0,1\text{Mпа}$

### Список литературы

1. Костерин В.А. и др. Обобщение экспериментальных данных по пределам стабилизации пламени на струях // Известия ВУЗов. Сер. «Авиационная техника». 1967. № 3.
2. Мингазов Б.Г. и др. О механизме стабилизации пламени в потоке двухфазной топливо воздушной смеси // Известия ВУЗов. «Авиационная техника» 1979. № 3. С. 68-74.

УДК 621.45.022

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В ГОМОГЕННОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ

Вахитов А.Р., ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань  
 Мингазов Б.Г., ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», г. Казань, [BGMingazov@kai.ru](mailto:BG Mingazov@kai.ru)

Предполагая, что в камерах сгорания происходит горение в турбулентном потоке однородной смеси, можно применить закономерности теории турбулентного горения. В частности, для определения полноты сгорания можно применить модель поверхностного сгорания осредненного

«моля» смеси, на основе которого в работе [1] получена зависимость для определения локальной полноты сгорания топлива на рассматриваемом участке, где «i» – номер участка:

$$\eta = \frac{3U_{i0}^3}{W'^3} \left\{ \frac{1}{3} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{3\Delta x \mathcal{E}}{l_i}\right) \right] - \frac{U_{i0}}{U_{i0}'} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\Delta x \mathcal{E}}{l_i}\right) \right] + \frac{U_{i0}^2}{U_{i0}'^2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Delta x \mathcal{E}}{l_i}\right) \right] \right\}, \quad (1)$$

В (1):  $W'$  – пульсационная скорость;  $U_{i0}$  – скорость сгорания с поверхности «моля»;  $\Delta x$  – ширина зоны горения;  $\mathcal{E}$  – интенсивность турбулентности – степень пульсации;  $l_i$  – радиус моля;  $U_i$  – нормальная скорость горения.

Данная зависимость позволяет определить полноту сгорания осредненного объема смеси с коэффициентом избытка воздуха  $a_i$  за время пребывания на участке камеры сгорания (КС) длиной и сгорающей с поверхности с турбулентной скоростью  $U_{i0} = U_i + W'$ .

Нормальная скорость горения определяется по параметрам смеси на входе в расчетный участок КС с помощью эмпирического соотношения [2]:

$$U_{i0} = U_{i0}' \left( \frac{T_{ci}}{500} \right)^{1.8} \left( \frac{P_i}{10^5} \right)^{-0.5} \left( 1 - \overline{G}_{r.n.} \right)^3, \quad (2)$$

где  $T_{ci}$  – температура газа в  $i$ -ом сечении;  $P_i$  – давление газа в  $i$ -ом сечении;  $\overline{G}_{r.n.}$  – расход продуктов сгорания;  $U_{i0}$  – нормальная скорость горения, определенная по многочисленным экспериментальным данным и обобщенная в виде зависимости  $U_{i0} = f(\alpha)$ .

Пульсационная скорость определяется соотношением:

$$W' = \varepsilon W, \quad (3)$$

где  $W$  – скорость истечения потока за горелочным устройством,  $\varepsilon$  – интенсивность турбулентности.

Параметры турбулентности, входящие в расчетные зависимости, можно оценить по эмпирической зависимости [3]:

$$\varepsilon = 0.041 \left( 1 + \beta^2 \operatorname{tg}^2 \varphi \right)^{0.5} \left( \frac{x}{r_n} \right)^{-0.5}, \quad (4)$$

где  $r_n$  – наружный радиус завихрителя;  $x = X + \Delta x$  ( $X$  – расстояние от фронтального устройства;  $\Delta x$  – расстояние от устья струи до фронта),  $\beta$  – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности завихрителя.

Для определения масштаба турбулентности  $l_0$  необходимо провести ряд преобразований.

Из теории турбулентности известна зависимость для определения коэффициента турбулентного обмена  $D_T$ :

$$D_T = l_{cm} W', \quad (5)$$

где  $l_{cm}$  – лагранжев масштаб турбулентности;  $W'$  – пульсационная скорость.

С другой стороны, в литературе [3] приведена зависимость для определения коэффициента турбулентной диффузии на начальном участке закрученной струи:

$$D_T = 0,00294(1 + \beta^2 \operatorname{tg}^2 \varphi)^{0,5} W_{cp} R_{mp}, \quad (6)$$

где  $\varphi$  – угол закрутки в струе;  $W_{cp}$  – средняя по расходу скорость струи;  $\beta$  – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности завихрителя;  $R_{mp}$  – радиус трубы.

Приравняв правые части в уравнениях (5) и (6) и учитывая, что масштаб турбулентности  $l_0 = 0,5l_{cm}$ , можно получить выражение для расчета масштаба турбулентности в жаровой трубе КС:

$$l_0 = 0.014 R_{mp} \left( \frac{x}{r_n} \right)^{0.5}, \quad (7)$$

Полученное значение локальной полноты сгорания характеризует полноту сгорания по отношению к топливу на входе в рассматриваемую зону горения.

Для расчета по представленной выше модели, использовались данные на входе камеры сгорания ГТД НК-38СТ.

Здесь давление на входе и температура на входе в камеру сгорания  $P_k = 25,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  $T_c = 700 \text{ К}$ , расход воздуха на входе в КС и расход топлива  $G_k = 52 \text{ кг/с}$ ,  $G_m = 0,95 \text{ кг/с}$  соответственно.

Конструктивно камера сгорания содержит жаровую трубу кольцевого типа, с 23-мя горелочными фронтowymi устройствами из жаростойкого сплава. Наружная и внутренняя стенки жаровой трубы имеют особый профиль с изгибами, в которых выполнены отверстия для подвода охлаждающего воздуха. В расчетах были заложены данные по геометрии и распределению воздуха по отверстиям реальной камеры сгорания.

Из графика распределения воздуха по длине жаровой трубы видно, что большая часть воздуха поступает в камеру сгорания через фронтное устройство, при этом в зоне горения преобладает зона невысоких температур (не выше 1800 К). Это способствует снижению выхода оксидов азота. Также стоит отметить малые габариты жаровой трубы, а значит, уменьшение времени пребывания газов в зоне горения, что также снижает уровень выбросов  $\text{NO}_x$ . Предложенная модель позволяет оперативно прогнозировать изменения параметров процессов камер сгорания и их величин на выходе.

Видно, что расчетные значения параметров хорошо согласуются с экспериментальными данными, это свидетельствует о возможности применения предложенной модели в практике доводки камер сгорания ГТУ.

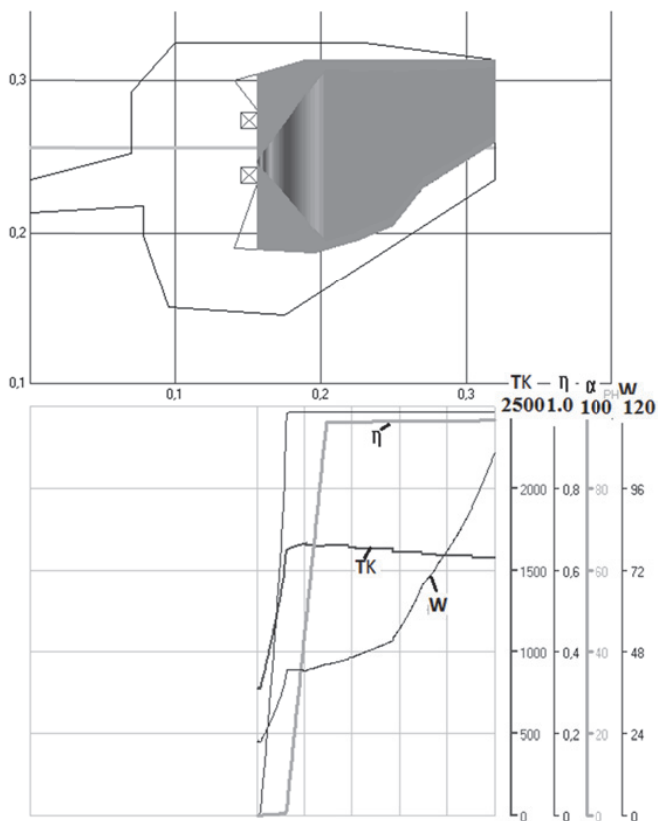


Рис. 1. Облик камеры сгорания и графики распределения параметров (средние значения температуры  $T$  (K), полноты сгорания  $\eta$ , скорости потока  $W$  (м/с) и распределения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ ) по длине жаровой трубы (параметры камеры сгорания:  $P_k^* = 2,414 \text{ МПа}$ ,  $T_k^* = 791 \text{ К}$ ,  $G_k = 46,15 \text{ кг/с}$ ,  $\alpha = 2,85$ ,  $\eta = 0,9858$ ,  $T_z^* = 1580 \text{ К}$ , концентрация  $\text{NO}_x = 64 \text{ мг/нм}^3$ )

### Список литературы

1. Ильяшенко С.М., Талантов А.В. Теория и расчет прямоточных камер сгорания. М.: Машиностроение, 1964. 306 с
2. Хакер Д.С. Модель стабилизации пламени в закрученном потоке, основанная на упрощенной теории пути смешения // Ракетная техника и космонавтика. 1974. № 1. С. 78–86.

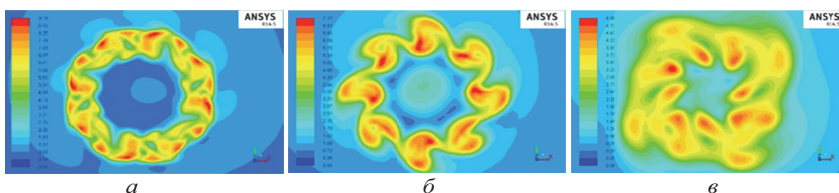
3. Мингазов Б.Г., Бакланов А.В. Математическая модель образования  $\text{NO}_x$  в камерах сгорания ГТД // Современные технологии – ключевое звено в возрождении отечественного авиастроения: Материалы Международной научно-практической конференции, 12-13 августа 2008 года. Т.1. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2008. 438 с.

УДК 621.45.056:66

## РАЗРАБОТКА ПОДХОДОВ К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МИКРОВИХРЕВОЙ ГОРЕЛКИ

Горшкалев А.А., Самарский университет, г. Самара, [agorsh@bk.ru](mailto:agorsh@bk.ru)  
Половинщикова М.В., Самарский университет, г. Самара, [pomashi@mail.ru](mailto:pomashi@mail.ru)

При проектировании камер сгорания малоразмерных ГТД, так же как и для камер высокомошных двигателей, возникают проблемы обеспечения известного комплекса требований: высокая полнота сгорания, благоприятное распределение температуры газа перед турбиной, пусковые и срывные характеристики и другие. В последние годы возрастает внимание к таким новым для ГТД направлениям как рекуперация тепла в предпламенные зоны в системах фильтрационного горения [1], или использования аддитивных технологий лазерного сплавления для выращивания сверхжаропрочных конструкций фронтных устройств [2]. В этом же ряду находятся и проводимые в Самарском университете [3] поиски новой технологии организации процессов горения, основанной на сжигании топлива в микровихревых структурах компланарного типа.



*а*

*б*

*в*

*а* – удаление 10 мм от среза КБ,

*б* – удаление 3 калибра канала от среза КБ,

*в* – удаление 5 калибров канала от среза КБ

*Рис. 1. Скалярное поле полной составляющей скорости на выходе из КБ с размером ячейки канала 12x12, режим работы ( $G_g = 30 \text{ г/с}$ )*

Микровихревая система сильно закрученных струй с одной стороны имеет ряд принципиальных преимуществ: она обладает высокой интен-