

УДК 621.452.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕШЕНИЯ В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ В ПРОГРАММЕ ANSYS CFX

© 2013 С. В. Крашенинников¹, О. В. Савченко²

¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

²ЗАО ВКБ РКК «Энергия»

Представлено расчётное исследование в программе ANSYS CFX процесса смешения реального газа в закрученных потоках вихревых горелок камер сгорания ГТД. Исследованы особенности тепломассообмена закрученного потока с окружающей средой и зоной обратных токов. Показаны качественная и количественная сходимость численного исследования и ранее проведённого физического эксперимента.

Вихревая горелка; закрученный поток; тепломассообмен; зона обратных токов; ANSYS CFX.

Организация эффективного рабочего процесса в камерах сгорания ГТД достигается изучением закономерностей его протекания и оценкой влияния на его основные характеристики определяющих конструктивных и режимных факторов. Одним из способов такого анализа, наряду с физическим экспериментом, является применение современных расчётных методов для исследования рабочего процесса камер сгорания ГТД, реализованных в универсальных программных комплексах вычислительной гидрогазодинамики, таких как ANSYS CFX, которые дают возможность моделирования сложной структуры течения в камере сгорания. При этом анализ результатов как численного, так и физического экспериментов требует представления обобщённых зависимостей, отражающих основные закономерности исследуемых процессов.

В качестве фронтальных устройств камер сгорания ГТД широкое применение нашли вихревые горелки, обеспечивающие интенсивный тепломассообмен в первичной зоне камеры сгорания. Закрученное течение, создаваемое вихревыми горелками, оказывает определяющее влияние на основные характеристики камер сгорания. Целью данной работы является оценка возможностей программного комплекса ANSYS CFX для моделирования параметров тепломассообмена закручен-

ного течения газа за вихревыми горелками камер сгорания ГТД.

При моделировании процесса смешения в закрученном потоке рассмотрено два аспекта: смешение активного потока с окружающей средой и смешение активного потока с зоной циркуляции. Представляет интерес сопоставление результатов численного моделирования, представленных в обобщённой форме, с аналогичными данными физического эксперимента. В качестве объекта сравнения выбраны результаты экспериментального исследования смешения потоков за вихревыми горелками, проведённого авторами [1], результаты которого были обобщены в зависимости от параметров, отражающих условие сохранения импульса.

Для моделирования закрученного течения была создана исходная геометрическая и конечно-элементная модели вихревой горелки и области свободного течения вблизи ее сопла. Они отражали особенности физических моделей вихревых горелок работы [1]: вихревая горелка со шнековым завихрителем диаметром 40 мм и цилиндрическим соплом длиной один калибр завихрителя.

В качестве факторов влияния на локальные и интегральные параметры закрученного потока выбраны геометрические характеристики вихревых горелок, обеспечивающих закрутку потока. Рас-

смотрено влияние таких геометрических параметров вихревых горелок, как угол наклона канавок шнека (шаг винта шнека), количество и площадь канавок.

Расчёт проводился в ANSYS CFX с использованием $k-\varepsilon$ модели турбулентности. Для получения осреднённых по времени значений рассматривался стационарный процесс истечения закрученной струи.

Важной особенностью закрученных потоков является их интенсивное перемешивание с внешней средой. Внешняя граница закрученной струи существенно шире, чем струи прямоочной, при этом закрученный поток характеризуется значительным приростом массы за счёт эжекции газа из окружающей среды [2].

Одним из наиболее простых методов определения интенсивности смешения струи, основанным на аналогии тепло- и массообмена в потоке, является метод графического интегрирования эпюр температуры в поперечном сечении струи. Для реализации этого метода в физическом эксперименте нагретая струя газа подаётся в среду с температурой окружающего воздуха. Данный случай был также реализован в численном эксперименте.

Рассмотрено смешение закрученной струи воздуха с температурой входа 473 К с окружающей средой, имеющей температуру 293 К.

Обработка данных методом графического интегрирования эпюр температуры для определения количества эжектируемого воздуха позволила представить полученные данные в обобщённом виде.

Коэффициент расхода в закрученной струе определялся по формуле

$$m_i = \frac{G_{i\text{cp}}}{G_0}, \quad (1)$$

где $G_{i\text{cp}}$ - осреднённый текущий расход воздуха; G_0 - начальный расход воздуха.

Осреднённый текущий расход воздуха

$$G_{i\text{cp}} = G_0 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n \left(f_j \cdot \frac{T_{i,j} - T_h}{T_0 - T_h} \right)}{n \cdot F_i}, \quad (2)$$

где n - количество разбиений по радиусу; F_j - площадь струи в сечениях по длине струи; T_0 - начальная температура струи, T_h - температура окружающего воздуха; $T_{i,j}$ - температура по радиусу струи; f_j - площадь разбиений по радиусу струи, принятая постоянной.

В соответствии с обобщённой зависимостью коэффициента расхода от параметров вихревой горелки, полученной в работе [1], результаты численного эксперимента были представлены в виде комплекса

$$\sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}} \cdot m_i \cdot \bar{f} = \frac{X_i/D}{\cos \varphi}, \quad (3)$$

где ρ_1 и ρ_2 - плотности потока и окружающего воздуха; \bar{f} - отношение площади каналов шнека к площади сопла; X_i - координата по оси потока; D - диаметр сопла вихревой горелки; φ - угол наклона канавок шнека. Данный комплекс имеет смысл условия сохранения начального импульса активного потока.

Обработанные в таком виде результаты численного эксперимента представлены на рис. 1. Здесь отдельными точками представлены результаты натурального эксперимента. Видны как качественная, так и количественная сходимость результатов численного и физического экспериментов.

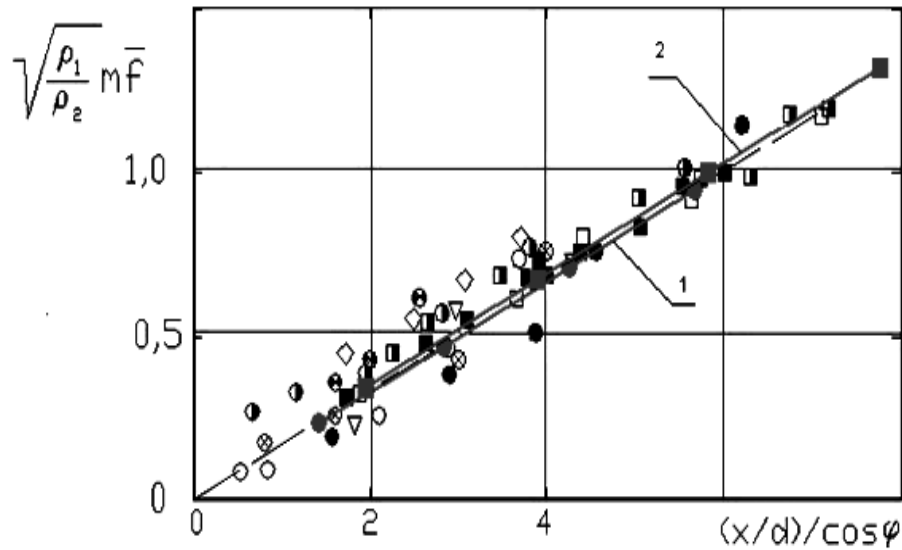


Рис.1. Обобщённые данные по смешению закрученной струи с внешней средой:
1 – $\varphi=45^\circ$; 2 – $\varphi=59^\circ$

Вторым аспектом в моделировании смешения в закрученном потоке является изучение тепломассообмена между закрученным потоком и зоной обратных токов в его приосевой области. В реальном закрученном потоке массообмен между активным потоком и зоной циркуляции (ЗЦ) происходит путём эжекции газа из зоны циркуляции по длине зоны и поступлением газа в ЗЦ крупномасштабными вихрями в кормовой ее части. В связи с этим в случае реального закрученного течения условие постоянства импульса активного потока следует связать с интегральным параметром, характеризующим степень эжектирования газа из ЗЦ. В качестве такого параметра предложено использовать статическое давление (разрежение) на оси горелки. Исследования, приведённые в работе [3], показали однозначную связь между окружной составляющей скорости, разрежением на оси закручивающего устройства и длиной зоны циркуляции.

В работе [1] в ходе анализа результатов натурального эксперимента установлена однозначная зависимость между разрежением на оси на срезе горелки и им-

пульсом активного потока. Для отражения данной зависимости в условиях численного эксперимента проведено моделирование смешения закрученного потока в изотермических условиях. В качестве геометрической модели использована модель вихревой горелки, рассмотренная выше.

Распределение статического давления в зоне обратных токов определялось в диапазоне режимов, соответствующих перепадам давления воздуха на вихревой горелке, равным 1,0...4,9 кПа. Результаты обработки полученных данных представлены на рис.2 сплошными линиями. Отдельными точками приведены результаты натурального эксперимента, проведённого на вихревых горелках в диапазоне диаметров шнека 16...40 мм при изменении геометрической характеристики завихрителя [2,3] 1,8...6,0.

Видно, что здесь, как и в предыдущем численном эксперименте, получены качественная и количественная сходимость результатов численного и натурального экспериментов.

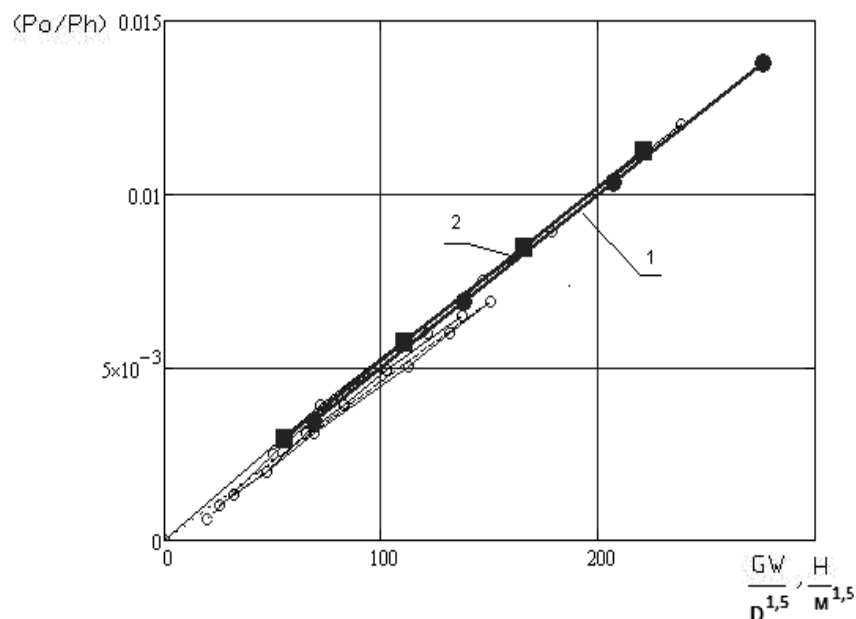


Рис.2. Обобщённые данные по эжектированию закрученной струёй из зоны обратных токов:
1 – $\varphi=45^\circ$; 2 – $\varphi=59^\circ$

Таким образом, в ходе численного эксперимента подтверждена возможность использования интегральных условий сохранения импульса для анализа течения в закрученной струе, подтверждена взаимосвязь разрежения на оси потока как меры эжекции из ЗЦ и импульса активного потока.

По результатам проведённых расчётов можно сделать вывод о том, что используемая модель для расчёта течения рабочего тела в закрученных потоках, сформированная в программном комплексе ANSYS CFX, позволяет рассчитывать распределение газодинамических параметров потока за вихревыми горелками, значительно уменьшать временные затраты при разработке новых конструкций, так как можно существенно сокращать объёмы натурных экспериментов. Также подтверждено, что тепломассообмен в закрученной струе однозначно определяется условием сохранения начального импульса активного потока.

Библиографический список

1. Цыганов, А.М. Исследование механизма массообмена в вихревых горелках [Текст] / А.М. Цыганов, О.В. Савченко // Вихревой эффект и его применение в технике: материалы VI междунар. науч.-техн. конф. - Самара: СГАУ, 1993. - С. 204-209.
2. Ахмедов, Р.Б. Аэродинамика закрученной струи [Текст] / Р.Б. Ахмедов. - М.: Энергия, 1977. - 240 с.
3. Абрамович, Г.Н. Турбулентное смешение газовых струй [Текст] / Г.Н. Абрамович. - М.: Наука, 1974. - 272 с.

MIXTURE MODELLING IN A SWIRLE FLOW IN THE ANSYS CFX PROGRAM

© 2013 S. V. Krasheninnikov¹, O. V. Savchenko²

¹Samara State Aerospace University

²“Energiya” plc.

The paper presents design research of mixing real gas in swirl flows of swirl burners of gas turbine engine combustion chambers in the ANSYS CFX program. The peculiarities of heat exchange of a swirl flow with the environment and the zone of reverse currents are investigated. The results of the numerical research and the previous physical experiment are shown to be in good qualitative and quantitative agreement

Swirl burner, heat exchange; swirl flow, heat and mass exchange, zone of reverse currents; ANSYS CFX.

Информация об авторах

Крашенинников Сергей Всеволодович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: s.v.krash@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы тепловых двигателей и энергетических установок.

Савченко Олег Владимирович, начальник группы, ЗАО ВКБ РКК «Энергия». E-mail: olegsav4nko@yandex.ru. Область научных интересов: моделирование процессов горения и смесеобразования в камерах сгорания тепловых двигателей.

Krasheninnikov Sergey Vsevolodovich, Candidate of Science (Engineering), Senior Lecturer of the Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara State Aerospace University. E-mail: s.v.krash@mail.ru. Area of research: work processes of heat engines and power systems.

Savchenko Oleg Vladimirovich, Head of Group, “Energiya” plc. E-mail: olegsav4nko@yandex.ru. Area of research: modeling of processes of burning and mixing in combustion chambers of heat engines.