

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКРУЧЕННЫХ ТЕЧЕНИЙ В ВИХРЕВЫХ ТРУБАХ

Казанцева О.В., Пиралишвили Ш.А.

Рыбинская государственная авиационная технологическая
академия им. П.А.Соловьева, г. Рыбинск

Закрученные течения представляют большой интерес для теоретических и экспериментальных исследований. Это объясняется, прежде всего, тем, что изучение данного класса течений необходимо для возможности их эффективного использования в различных технических устройствах. Диапазон практических приложений связанных с использованием закрученных потоков в различных отраслях промышленности постоянно расширяется.

Известно, что местная закрутка потока широко используется в энергетических установках и других технических устройствах для организации и интенсификации различных процессов. Как показывают экспериментальные исследования, интенсивная закрутка потока оказывает большое влияние на характеристики поля течения: перераспределение полной энтальпии, улучшение смесеподготовки в результате интенсификации массообмена, повышение интенсивности горения в реагирующих потоках, способность струи к организации аэродинамической стабилизации пламени в камерах сгорания авиационных двигателей.

Развитие и внедрение в производство новой техники требует изучения локальных, интегральных и турбулентных свойств закрученного потока в различных (зачастую специфических) условиях, к числу которых можно отнести, например, каналы с изменяющейся по длине площадью поперечного сечения, каналы с диафрагмированным выходным сечением и т. д.

Несмотря на то, что в настоящее время накоплен обширный экспериментальный материал по исследованию газодинамики закрученных потоков, не существует единого мнения относительно механизма энергоразделения и температурной стратификации в таких течениях. Экспериментальное исследование внутренних течений не всегда возможно, а также слишком дорогостояще и трудоемко. Поэтому возникла необходимость численного моделирования вихревых потоков с целью расчетов полей температуры, давления, скорости и линий тока.

Таким образом, дальнейшее изучение закономерностей течения, тепло- и массообмена закрученных потоков в каналах, систематизация этих данных и разработка инженерных методов расчёта таких течений являются актуальной научной и прикладной проблемой.

Для создания математической модели закрученного течения были выбраны уравнения Навье-Стокса, записанные в декартовой системе коор-

динат для случая трёхмерного стационарного, установившегося во времени, течения сжимаемого теплопроводного газа; уравнение энергии и уравнение состояния. Для замыкания системы уравнений использовались двухпараметрические модели турбулентности $k-\varepsilon$, $k-\omega$. Был сделан численный расчет вихревого течения воздуха в однорасходной и противоточной вихревых трубах на пакете TASKFLOW. Сравнение расчетных данных с экспериментальными показывает, что составленная модель адекватно описывает течение в вихревой трубе.

Исходная система уравнений имеет вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = -\mu_b \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \tilde{H}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{U}_j \tilde{H}) = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{Q}_j + \rho \tilde{u}'_j \bar{H}) \quad (4)$$

$$P \nu = RT \quad (5)$$

В качестве граничных условий задавались следующие параметры:

- полное давление на входе в диапазоне $P^* = 2-4$ атм;
- полная температура на входе $T^* = 294$ К;
- статическое давление на горячем выходе $P = 1,38$ атм;
- статическое давление на холодном выходе $P = 1,013$ атм;
- на стенках выдерживались условия «прилипания»;
- стенки адиабатные, стационарные.

Геометрические параметры для противоточной вихревой трубы:

- безразмерная длина трубы $L = 5,5$;
- радиус трубы $r = 0,047$ м;
- безразмерный радиус диафрагмы $r_D = 0,37$;
- безразмерная площадь горячего выхода $F_r = 0,2$;
- безразмерная площадь соплового ввода $F_c = 0,05$.

Геометрия трубы была выбрана в соответствии со статьёй [1] для возможности последующего сравнения результатов численного расчета с экспериментальными данными.

На рис.1 схематически показана геометрия расчетной области.

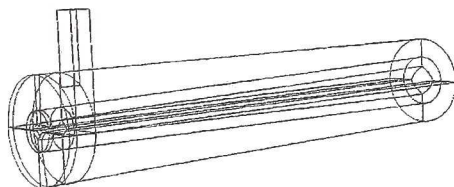


Рис.1. Геометрия расчётной области (цилиндрическая вихревая труба с тангенциальным завихрителем)

Численный расчет был выполнен на пакете TASK FLOW. Поставленная задача решалась как стационарная в нестационарной постановке методом установления по времени.

Как уже было сказано выше, для замыкания системы исходных уравнений сначала была выбрана двухпараметрическая модель турбулентности $k-\varepsilon$, а затем был выполнен расчет с привлечением модели турбулентности $k-\omega$. Отметим, что на начальной стадии описанных расчетов было замечено, что наилучшее согласование с опытными данными достигается при использовании совместной SST-модели турбулентности.

На рис. 2 представлены расчеты течения воздуха в односторонней и двухсторонней вихревых трубах, выполненные с применением совместной модели.

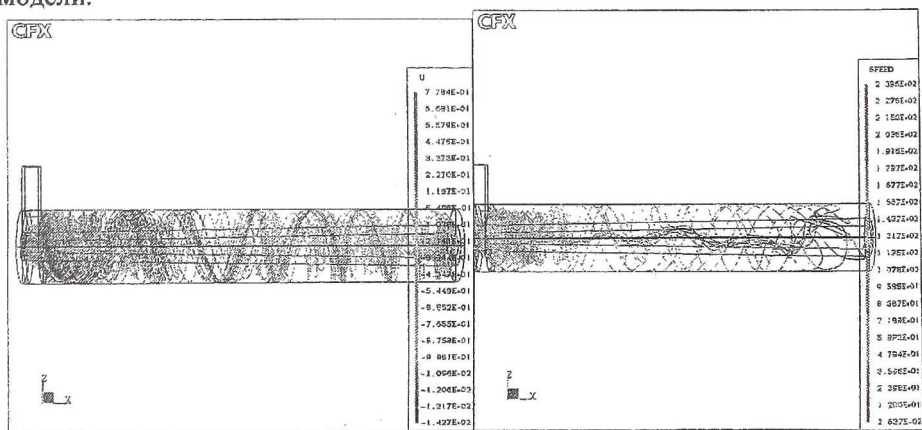


Рис.2. Линии тока в противоточной и односторонней вихревых трубах

Сравнение рассчитанных абсолютных и относительных эффектов подогрева с экспериментальными [2] показывает, что составленная модель адекватно описывает течение в вихревой трубе:

- для горячего потока абсолютные эффекты подогрева составляют 6 К (и в расчете и в эксперименте) ;
- для холодного потока расчетные эффекты – 17 К, а в эксперименте – 20 К.

На рис.3 представлена визуализация картины течения. Отчетливо видны приосевой и пристеночный вихри, а также возвратное течение, возникающее у места выхода горячего потока.

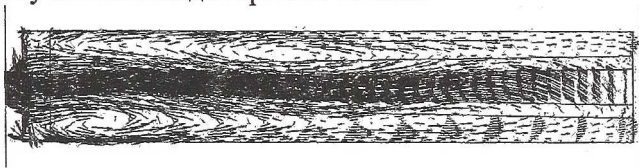


Рис.3. Вектора осредненной скорости в сечении, перпендикулярном оси у

Анализ полей температур однорасходной и двухрасходной вихревых труб показал, что значения эффектов подогрева в первой значительно превышают эффекты подогрева во второй.

Изменение полной температуры по радиусу вихревой трубы свидетельствует об уменьшении полной энергии частиц газа при их перемещении из пристенной зоны камеры энергоразделения в приосевую. Самая низкая температура наблюдается на оси трубы в сечении соплового ввода, примыкающем к отверстию диафрагмы.

Сопоставление профилей осевой составляющей скорости в различных сечениях камеры энергоразделения показывает, что их уровень несколько выше для приосевых масс газа. Наибольшее значение осевая составляющая скорости имеет в сечениях примыкающих к диафрагме, что соответствует опытным данным.

По результатам расчета можно сделать выводы о картине течения в рабочем пространстве вихревых труб. Интересна визуализация течения, которая выявляет не только такие характерные составляющие закрученного потока, такие как пристеночный и приосевой вихри, но и позволяет наблюдать прецессионное движение ядра потока.

Дальнейшие расчеты дают возможность исследовать взаимосвязь геометрических характеристик вихревых труб с эффектами подогрева и охлаждения, а следовательно, и возможность их более эффективного использования в энергетических установках, что представляет большой практический интерес, так как позволяет без проведения дорогостоящих экспериментов получить обширную информацию о газодинамической картине течения.