

УДК 532.556.4;532.697.3;621.45.032;621.452.322.032

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДИФFUЗОРНЫХ КАНАЛАХ И ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЕМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ

© 2011 г.

Д.Е. Пудовиков

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

dimonpe@mail.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Рассмотрены различные подходы к моделированию отрывных течений в пространственных диффузорных каналах. Определена структура и количественные характеристики течения. На основе сравнения с экспериментальными данными показана необходимость использования нестационарных методов расчета. Исследованы возможности применения генераторов синтетических струй и пульсирующего вдува для снижения потерь в канале.

Ключевые слова: газовая динамика, нестационарность, турбулентность, отрыв, управление течением.

В различных технических устройствах, в том числе в авиационных двигателях, используются диффузорные каналы, параметры потока в которых существенно влияют на характеристики объекта, составной частью которого они являются. Современные требования к геометрии канала, связанные со стремлением к компактности, приводят к тому, что течение в диффузоре становится отрывным и имеет высокий уровень аэродинамических потерь. Стремление к минимизации потерь за счет профилирования каналов или применения активных или пассивных способов управления течениями требует возможности осуществления достаточно достоверных расчетов течения в таких каналах.

Современный уровень развития вычислительной техники позволяет использовать для анализа течения в диффузорных каналах и эффективности способов управления ими методы расчета, основанные на решении как уравнений Рейнольдса, так и уравнений Навье – Стокса. При этом удается выдерживать требования по количеству узлов расчетной сетки, количеству ячеек в пристеночной области и размеру областей, формирующих начальные и граничные условия, выполнение которых должно обеспечивать адекватность расчетов.

В [1] при экспериментальных исследованиях течения в кольцевых диффузорах было обнаружено образование стабильно существующих неоднородностей потока на выходе из канала, т.е. появление устойчивых трехмерных

структур в исходном двухмерном потоке. Моделирование этого эффекта было одной из целей настоящего исследования. Численные расчеты течения проводились с использованием двухмерных и трехмерных уравнений Рейнольдса, замкнутых моделями турбулентности в стационарной (RANS) и нестационарной (URANS) постановке. Были проведены также расчеты на основе прямого численного интегрирования нестационарных уравнений Навье – Стокса с помощью комбинированного RANS/ILES метода.

Сопоставления расчетов и данных экспериментов показали, что при отрыве потока в диффузоре возникают нестационарные процессы, в результате которых формируются эволюционирующие крупные неоднородности потока, которые могут быть охарактеризованы как система парных вихревых жгутов, причем количество этих жгутов не зависит от качества сетки. Степень разрешения пограничного слоя и количество ячеек в окружном направлении влияют только на форму и размеры самих жгутов, но не на их количество. При длительном осреднении рассчитываемых параметров течения в кольцевом диффузоре сохраняется двухмерность его структуры. При наличии небольшой начальной неоднородности положение крупномасштабных образований может стабилизироваться, и исходное, практически двухмерное, течение может становиться трехмерным. В случае отсутствия неоднородностей стабилизации не происходит. Вместо этого наблюдается медленное вращение структуры в окружном направлении. Полученное

в результате выполнения таких расчетов поле осредненных по времени параметров оказывается равномерным в окружном направлении. При этом также достигается согласование уровней аэродинамических потерь, определенных по опытными и расчетным данным.

Аналогичные расчеты с помощью RANS были выполнены для прямоугольного криволинейного диффузорного канала. Согласно их результатам, за областью отрыва на выходе из диффузора формируется существенно неоднородный поток.

Эксперименты показывают, что осредненное поле течения на выходе из канала приблизительно симметрично относительно плоскости симметрии канала. Из расчетов с использованием стационарных уравнений Рейнольдса следует, что симметрия в выходном сечении отсутствует. Однако при нестационарных расчетах на значительном отрезке физического времени и осреднении по реализациям асимметрия может исчезнуть.

Важной задачей расчетов является определение гидравлических потерь для исследуемых течений. Потери полного давления получались по результатам расчетов распределений параметров в выходном сечении диффузора с их последующим осреднением и интегрированием по площади. Аналогичным образом определялись гидравлические потери в эксперименте. Осредненное значение полного давления сравнивалось с его средним значением в начальном сечении канала.

Стационарное моделирование выполнялось с использованием как двухмерных, так и трехмерных уравнений Рейнольдса. Использовались различные программные коды, которые предварительно были апробированы для других расчетов течений в каналах. Следует отметить, что при использовании этих кодов при одинаковой размерности задачи и близких расчетных сетках для различных каналов сложной формы, но с течением без развитых отрывных зон, различия в результатах расчетов практически не наблюдается. Но при исследовании течения для рассматриваемых диффузорных каналов имеется существенное различие в результатах расчетов. Двухмерные расчеты дают заниженный уровень потерь. Все трехмерные расчеты по RANS технологии также, хотя и в различной степени, занижают потери. Удовлетворительное согласование получено только при использовании URANS и RANS/ILES метода. Нужно отметить, что для получения каждой точки при этом требуется около 1000–1500 часов процессорного времени на компьютере с тактовой частотой процессора 2.2 ГГц. Вычислительные затраты при исполь-

зовании URANS несколько меньше. Преимущество комбинированного RANS/ILES метода проявляется в возможности воспроизведения не только крупномасштабной нестационарности (которая получается практически такой же, как в URANS), но и пульсационной структуры. Характеристики турбулентности в URANS получаются в виде квазистационарных значений энергии турбулентности, турбулентной вязкости и других параметров. Основные результаты, полученные при выполнении этой части работы, приведены в [2].

Другим вопросом исследования является эффективность применения различных активных методов управления течением для снижения уровня гидравлических потерь в рассматриваемых диффузорных каналах.

Исследуется эффективность применения синтетических струй для управления отрывом в пространственном криволинейном диффузорном канале. Генератором таких струй может служить присоединенная к основному каналу полость с подвижной стенкой. Изучается влияние частоты и амплитуды периодического движения стенки, местоположения и формы отверстия. Выполнена серия методологических расчетов для выбора оптимальных параметров моделирования генератора синтетических струй. Установлено, что применение синтетических струй позволяет значительно – до 45% – снизить потери в канале.

Также исследованы возможности пульсирующего вдува по снижению потерь. Показано, что такой способ управления течением неэффективен и не дает ожидаемого эффекта.

В получении представленных результатов принимали участие С.Ю. Крашенинников, Ю.Ф. Кашкин, А.Е. Коновалов, Д.А. Любимов, В.А. Степанов, А.Ю. Макаров, С.А. Торохов, П.Д. Токталиев.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 08-01-00308) и Государственной программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-3876.2008.1).

Список литературы

1. Ледовская Н.Н. Экспериментальное исследование трехмерной структуры отрывного течения в осесимметричных кольцевых диффузорах // Инженерно-физический журнал. 1986. Т. 51, №2. С. 321–328.
2. Кашкин Ю.Ф. и др. Экспериментальное и расчетное исследование особенностей течения с отрывом потока в дозвуковых диффузорах // Изв. РАН. МЖГ. 2009. №4. С. 92–99.

**NUMERICAL MODELING OF SEPARATED FLOW IN SPATIAL DIFFUSER DUCTS
AND APPLICATION OF ACTIVE FLOW CONTROL METHODS FOR LOSSES DECREASING**

D.E. Pudovikov

Different approaches to numerically modeling separated flows in spatial ducts are considered. The structure and quantity characteristics of the flow are determined. Based on the comparison with experimental data, it was shown that only unsteady numerical methods can be used. Effects for losses decreasing of synthetic jets and pulsing injections were investigated.

Keywords: gas dynamics, nonstationarity, turbulence, separation, flow control.