

УДК 532.517

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОРГАНИЗОВАННЫХ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ И ВИХРЕВОГО ТЕПЛООБМЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОБЛОЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2011 г.

С.А. Исаев

Санкт-Петербургский госуниверситет гражданской авиации

isaev3612@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Развивается концепция управления до- и сверхзвуковым отрывным обтеканием и теплообменом для уединенных и пакетных тел с помощью поверхностных (луночных) и объемных (пластинчатых) струйных и вихревых генераторов в воздушных и масляных средах. Разработан и верифицирован основанный на решении уравнений Навье – Стокса и Рейнольдса с помощью многоблочных вычислительных технологий пакет VP2/3. Представлены фундаментальные и прикладные проекты, в том числе смерчевая интенсификация теплообмена при обтекании луночных рельефов, и управление обтеканием профилей с вихревыми ячейками.

Ключевые слова: отрывные и струйные течения, вихревой теплообмен, турбулентность, лунки, ячейки, многоблочные технологии.

Развитие концепции управления обтеканием тел с помощью организованных вихревых структур

В 1977 году проф. И.А. Беловым предложена концепция управления обтеканием тел с помощью организованных крупномасштабных вихревых структур, которая в дальнейшем использовалась для создания перспективных аэродинамических форм ступенчатых тел, обладающих низким аэродинамическим сопротивлением и головной стабилизацией в широком диапазоне чисел Маха. В последние десятилетия эта концепция получила развитие в понятии обобщенной вихревой ячейки, в качестве которой рассматриваются поверхностные (луночные) и объемные (пластинчатые) вихрегенераторы, в том числе при интенсификации закрученного в них потока за счет отсоса. Большое внимание уделено идентификации струйно-вихревых структур в пространственных отрывных течениях, играющих определяющую роль в физических механизмах вихревой интенсификации процессов переноса импульса и тепла, причем акцент делается не только на анализе закрученного потока в уловленных или специально сгенерированных вихрях, но и на детальном рассмотрении влияния распространяющихся спиралевидных вихрей на характеристики течения и теплообмена в ближнем и дальнем следе, а также на обтекание тела (кры-

ла) в целом. Решаются фундаментальные задачи интенсификации конвективного теплообмена при нестационарном обтекании неоднородной жидкостью уединенных и пакетных цилиндров со струйными и вихревыми генераторами, прикладные задачи ветроэнергетики, архитектурно-строительной аэродинамики высотных сооружений и городской застройки, распространения дыма в помещениях метрополитена, в автомобильных тоннелях, прогнозирования опасного сдвига ветра в окрестности аэропортов при взлете-посадке воздушных судов и др. Инструментом исследования являются развитые в рамках концепции расщепления по физическим процессам с использованием обобщенной процедуры коррекции давления многоблочные вычислительные технологии решения уравнений Навье – Стокса и Рейнольдса (URANS) с замыканием последних по дифференциальным моделям турбулентности (переноса сдвиговых напряжений MSST и вихревой вязкости SA), реализованные в специализированном пакете VP2/3. Его верификация проведена на тестовых задачах до- и сверхзвуковой аэромеханики и конвективного теплообмена, имеющих физические аналоги. По архитектурно-строительной аэродинамике рассмотрена возможность снижения знакопеременных нагрузок на высотные сооружения цилиндрической формы за счет установки дырчатого кожуха, обеспечивающего перепускание высоконапорного воздуха из зоны высокого давления в область низкого давления в следе. Возникающее в зазоре меж-

ду цилиндром и кожухом интенсивное движение воздуха может быть использовано для работы встроенных ветродвигателей.

Смерчевая интенсификация теплообмена в каналах с нанесенным на стенку луночным рельефом

На основе экспериментальных и численных исследований обсуждаются физические механизмы вихревой интенсификации теплообмена при обтекании луночных рельефов [1]. Эксперименты поставлены на стендах с одиночными сферическими и овальными лунками на пластине и на стенке узкого канала для разных рабочих сред с использованием различной измерительной техники.

Сопоставлены численные результаты, полученные с помощью различных подходов к моделированию турбулентности (URANS, SASMSST, LES). Предложены овальные лунки, которые даже при умеренных глубинах заметно превосходят по тепловой и теплогидравлической эффективности эквивалентные (по площади пятна) более глубокие сферические лунки. На основе анализа эффективной генерации струйно-вихревых структур обсуждается рациональная форма лунок. Предложена классификация рельефов, состоящих из луночных ансамблей с конечным числом лунок. Исследована интерференция вихревых структур около системы из двух-трех лунок, расположенных одна за другой по схеме В. Терехова и А. Халатова. Проанализированы однорядные луночные рельефы в узких каналах по схеме С. Исаева, найдено пороговое значение количества лунок, при котором теплогидравлические характеристики канала с лунками стабилизируются. Наконец, согласно подходу Г. Кикнадзе и Ф. Лиграни рассмотрены шахматные рельефы, в которых центры ближайших лунок составляют равносторонний треугольник или квадрат (с расположенной в центре дополнительной лункой). Для течений в канале с неограниченным числом лунок определены предельные характеристики луночных рельефов на основе рассмотрения периодических модулей с одной или несколькими лунками. Такой подход обосновывается сравнением численных прогнозов с данными экспериментов М. Готовского и применяется для анализа влияния на теплогидравлическую эффективность каналов геометрии луночных пакетов, а также для обоснования преимущества овальных лунок по сравнению со сферическими.

Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками

Одна из актуальных проблем современной аэрогидродимеханики, связанная с управлением обтеканием тел с вихревыми ячейками (ВЯ), была инициирована в середине 90-х гг. XX века, с одной стороны, проектом летательного аппарата ЭКИП (экология и прогресс) конструкции Л.Н. Щукина, а с другой стороны, – продолжением под руководством Г.Ю. Степанова фундаментальных исследований по уловленным вихрям. В отличие от циркулирующих потоков в кавернах, интенсивность которых не превышает 50%, в ВЯ на теле интенсифицируется отрывное течение за счет энергозатратных способов, таких как отсос воздуха через поверхность размещенного в каверне центрального тела (распределенный отсос) или через щели в контуре каверны (сосредоточенный отсос). При расходах отсасываемого воздуха порядка 1–2% оказалось возможным увеличить скорости возвратных токов в ячейке почти до скорости внешнего потока, что позволило устранить или существенно уменьшить отрывные зоны около тела. Монография [2] подытожила результаты первоначальных исследований по аэродинамике тел с вихревыми ячейками (круговой цилиндр, состоящий из дуг окружности экиповский профиль с четырьмя ВЯ). Проект Еврокомиссии VortexCell2050 придал новый импульс исследованиям и существенно расширил их географию (Англия, Италия, Германия, Нидерланды). Новые экспериментальные стенды созданы в ИМ МГУ (Россия), в ЧИРА (Италия), в университетах Эйнховена (Нидерланды) и Саутгемптона (Англия). Использован опыт решения задач с помощью модели крупных вихрей, накопленный в Мюнхенском техническом университете. Существенный прогресс достигнут в отечественных исследованиях в рамках URANS. Осуществлена глубокая модернизация вычислительного комплекса и его распараллеливание, что позволило перейти к решению многомерных (в том числе пространственных) нестационарных задач. Выполнено обобщение процедуры коррекции давления на случай отрывных течений сжимаемого газа, в том числе при наличии ударных волн. Обсчитаны практически все имеющиеся по проекту экспериментальные установки. Обнаружены критические режимы турбулентного обтекания сжимаемым вязким газом тел (диапазон критических чисел Маха для толстых экиповских профилей начинается с 0.45), когда управление с помощью ВЯ оказывается неработоспособным. Рассмотрены разнообразные профили различной толщины с

разным числом ВЯ (геттингеновский, НАСА, CIRA и др.). Особое внимание уделено анализу пространственной нестационарной вихревой структуры течения внутри ВЯ (поперечные колебания) и в ее окрестности (продольные колебания). Решены сопряженные задачи обтекания цилиндра с детализацией системы обеспечения щелевого отсоса с использованием вентилятора.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-08-00062, 11-01-00039) и ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России»

2009_1.5_000-010.

Список литературы

1. Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. СПб.: Судостроение, 2005. 398 с.
2. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В. Ермишина и С.А. Исаева. М.: МГУ, 2003. 360 с.

SIMULATION OF ORGANIZED SEPARATED FLOW AND VORTEX HEAT TRANSFER USING OF MULTI-BLOCK COMPUTATIONAL TECHNOLOGIES

S.A. Isaev

Concepts of controlling sub- and supersonic separated and jet flows control as well as vortex heat transfer enhancement are realized for tandem of bodies, thick profiles with vortex cells and dimpled relieves using multi-block computational technologies and VP2/3 package.

Keywords: separated and jet flows, vortex heat transfer, turbulence, dimples, cells, multiblock technologies.