

Основанный на многоблочных вычислительных технологиях пакет аэрогидромеханического и теплофизического профиля VP2/3

С.А. Исаев¹, А.Г. Судаков¹, П.А. Баранов¹, С.В. Гувернюк², С.В. Стрижак³, А.Е. Усачов⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
isaev3612@yandex.ru

²Институт механики МГУ, guv@mail.ru

³Московский государственный технический университет, strijhak@yandex.ru

⁴Московский филиал ЦАГИ, usachev_a@mtu-net.ru

Аннотация — Дается генезис многоблочных вычислительных технологий (MBT) и пакета VP2/3 (скорость – давление, 2D/3D версии) для решения задач вихревой гидродинамики и теплообмена в рамках подхода, основанного на решении уравнений NS-RANS&URANS. Особое внимание уделяется апробации модели переноса сдвиговых напряжений Менстера (MSST) и ее модификации для расчета отрывных течений. Верификация MBT и VP2/3 проводится на многочисленных примерах, имеющих экспериментальные аналоги. Разработанный пакет применен для решения фундаментальных проблем смерчевой интенсификации теплообмена на луночных рельефах и управления обтеканием тел с вихревыми ячейками. Также решен широкий круг прикладных задач, в том числе задымления залов метрополитена при пожаре в вагоне поезда, предупреждения опасного сдвига ветра при взлете – посадке воздушных судов, архитектурно-строительной аэродинамики и др.

Ключевые слова — Уравнения Навье-Стокса и Рейнольдса, модели турбулентности, многоблочные вычислительные технологии, пакет VP2/3, тестовые примеры, фундаментальные и прикладные задачи.

I. Введение

Вычислительная гидродинамика (CFD) – соединение вычислительных методов (прикладной математики) и математических моделей гидромеханики – стремительно развивается, прежде всего, благодаря бурному прогрессу вычислительной техники (компьютеров) и практически сформировалась при жизни одного поколения исследователей. В лекции [1] один из родоначальников

CFD Б.Сполдинг отметил важность разработки метода контрольного объема для решения исходных уравнений для описания гидродинамических процессов (уравнений Навье-Стокса). На начальном этапе развития, который характеризовался использованием ЭВМ с очень ограниченными вычислительными ресурсами (БЭСМ4-6, М220), для их экономии управляющие уравнения записывались в преобразованных переменных: завихренность – функция тока [2]. Использование грубых схем дискретизации членов уравнений – противопоточных схем с односторонними разностями – обуславливалось необходимостью обеспечить сходимость итерационного процесса решения задачи. Однако при моделировании циркуляционных течений с замкнутыми линиями тока [3] обнаружилось, что такие схемы приводят к большим погрешностям и для уточнения результатов требуется применять схемы высокого порядка аппроксимации, например, схемы Акаравы второго и четвертого порядка. Возникшая проблема, известная в CFD как проблема численной диффузии, также имела место при рассмотрении уравнений в естественных переменных: декартовых составляющих скорости – давления [4,5] и была решена с помощью дискретизации конвективных членов уравнений противопоточной схе-

мы с квадратичной интерполяцией Леонарда [6], а также за счет адаптации сетки под сдвиговые слои на границе отрывной зоны [7].

В 70-90-е гг. широко использовался подход, когда осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса замыкались с помощью двухпараметрической диссипативной модели турбулентности - $k-\varepsilon$ - модели Лаундера-Сполдинга [8]. При расчете течений с крупномасштабными вихрями для уточнения влияния кривизны линий тока на характеристики турбулентности применялись различные поправки, одна из которых, следуя Родди-Лешцинеру, представляла собой функцию f_c от турбулентного числа Ричардсона Ri_t с дополнительной полуэмпирической константой C_c [$f_c=1/(1+C_c Ri_t)$], на которую умножался коэффициент турбулентной вязкости μ_t . При решении тестовых задач о течении в квадратной каверне, обтекания диска и композиции диска и цилиндра [8,9] показано, что выбор величины $C_c=0.1$ обеспечивает наилучшее согласование расчетных и экспериментальных данных. Также было обоснована применимость метода пристеночных функций в зонах отрывного течения.

На рубеже 90-х гг, в целом, сформировалась методология конечно-объемного решения задач, в дальнейшем (на индустриальном этапе развития CFD) нашедшая отражение в пакетных технологиях [6]. Ее основные черты следующие.

- Дискретизация исходных уравнений, записанных в приращениях зависимых переменных (включающих декартовы составляющие скорости - давление) в криволинейных неортогональных координатах, на центрированном шаблоне с расположением величин зависимых переменных в центре расчетной ячейки моноблочной сетки.

- Решение системы уравнений глобальными итерациями в рамках концепции расщепления по физическим процессам с использованием процедуры согласованной коррекции давления (SIMPLEC) с регуляризацией Рхи-

Чоу на центрированной сетке при выборе параметра релаксации равным 0.1.

- Дискретизация конвективных членов уравнений переноса в неявной части по противопоточным односторонним разностям и в явной части по одномерной версии схемы Леонарда.

- Увеличение коэффициента диффузионного переноса в неявной части уравнений позволяет избежать высокочастотных осцилляций в решении.

- Повысить скорость сходимости глобальных итераций позволяет решение разностных уравнений методом неполной матричной факторизации (SIP – сильно неявная процедура Стоуна).

Расчетная методология прошла тестирование на двумерных задачах с фиксированной и нефиксированной точкой отрыва: о циркуляционном течении в квадратной каверне с подвижной крышкой, об отрывном течении в ступенчатом канале, о симметричном обтекании диска и цилиндра, поперечного кругового цилиндра. Особо следует отметить проведенное детальное исследование существенного (на порядок величины) снижения сопротивления тел при их тандемном расположении (тел с передней срывной зоной - ПСЗ) по сравнению с одиночными плохообтекаемыми телами [6].

II. ГЕНЕЗИС МВТ

Продолжающийся индустриальный (по Госмену) этап развития CFD связан с разработкой продуктов – пакетов прикладных программ, коммерческих, универсальных и некоммерческих, универсальных и специализированных. Среди первых из них, прежде всего, следует отметить зарубежные разработки, начало которым положил сполдингский PHOENICS, а наибольшую известность снискали FLUENT, CFX, FIDAP. Из отечественных пакетов, в основном ориентированных на решение конкретных задач, можно указать FlowVision Аксенова, GasDynamics Tools Зибарова и SINF Смирнова. В

последние годы стали популярными открытые пакеты и, в частности, OPEN FOAM.

Все пакеты объединяет общность структуры, включающей препроцессор, решатель и постпроцессор. Много общего можно найти в реализации расчетных процедур, хотя они в коммерческих пакетах входят в закрытое для пользователя ядро решателя. До недавнего времени пакеты разделялись по использованию структурированных и неструктурированных сеток, причем проблема построения расчетных сеток позиционировалась как одна из важнейших в CFD. В принципе и сейчас, когда алгоритмы расчета на сетках различного типа унифицировались, и различия между пакетами сгладились, в суммарном времени решения задачи построение сетки занимает по-прежнему достаточно значительную долю. Во многом это связано с тем, что концептуально решение современных задач не намного продвинулось по сравнению со временем, когда господствовали моноблочные сетки. И даже то, что сегодня в расчетную практику вводятся многоблочные разномасштабные сетки, они несут на себе отпечаток не снятых ранее трудностей, т.к. основываются на компонентно-адаптивных по Катлеру поверхностях раздела, т.е. имеют общие границы подобластей. Неструктурированные сетки хороши тогда, когда они адаптированы к гидродинамическим особенностям течения, однако при этом такие сетки используют чрезмерный вычислительный ресурс даже с учетом возможностей современных компьютеров.

В известной степени, альтернативный подход, не требующий повышенного внимания к построению криволинейных согласованных сеток, базируется на применении структурированных многоблочных сеток с их частичным пересечением. Сам по себе такой подход давно известен (с 70-х гг). *Overlapping grids* (сетки с перекрытием) использовались, прежде всего, для дискретизации многосвязных областей. В монографии [5] такие сетки применены для расчета течения

и теплообмена в пакете труб, причем в зоне пересечения сеток параметры определяются с помощью линейной интерполяции.

Проблематика обтекания толстых профилей с вихревыми ячейками десять лет назад инициировала разработку MBT, реализованных в специализированном пакете прикладных программ VP2/3 [10]. Их несомненное достоинство состоит в улавливании разномасштабных элементов структуры отрывного течения на совокупности сеток простой топологии соответствующего масштаба, накладываемых друг на друга. В результате достигается не только значительная экономия сеточных ресурсов, но и повышение точности решения за счет размещения сеток только в желательных местах (определяемых интерактивно) с настройкой на рассчитываемую картину течения. Так, например, хорошее разрешение пристеночной области течения за счет введения отдельной мелкой сетки позволило без существенных затруднений перейти на современные низкорейнольдсовы модели турбулентности, такие как модель переноса сдвиговых напряжений Ментера (MSST) [11] и модель вихревой вязкости Спаларта-Аллмареса (SA) [12]. Наложившая мелкая сетка в ближнем следе за круговым цилиндром способствовала надлежащему разрешению нестационарной вихревой дорожки Кармана. Особое внимание уделяется воспроизведению мелкомасштабного течения около скругленной острой кромки (например, в канале с круговой каверной), в окрестности которой вводится специальная сетка соответствующего масштаба. Также с помощью отдельной сетки выделяется зона расположения развивающегося сдвигового слоя. Вообще говоря, количество вводимых сеток неограниченно и в пакете VP2/3 средствами объектно-ориентированного программирования осуществляется их автоматическое соединение и установление связей между ними. Безусловно, введение дополнительной сетки, связанной с той или иной гидродинамической (или физической) осо-

бенностью течения (поля характеристик), настройка ее на соответствующий масштаб осуществляются в ходе получения предварительного решения. Важную роль при этом отводится интерполяции данных с сетки на сетку и не только на этапе подготовки к решению задачи. Вообще рассматриваемый подход, связанный с необходимостью определения параметров в области пересечения сеток, представляется дискуссионным, поскольку существует опасение, что нарушается консервативность. Представляется оправданным, что используется та или иная интерполяционная процедура. В [10] численно доказана эквивалентность консервативной и линейной интерполяции. Также разработаны процедуры коррекции, обеспечивающие сохранение массы на пересекающихся многоблочных сетках.

Постепенно многоблочный подход был обобщен для анализа пространственных отрывных течений; для интерпретации нестационарных, в основном циклических режимов, в том числе при использовании скользящих сеток; для расчета конвективного теплообмена около луночных рельефов, в пакетах труб со струйными и вихревыми генераторами, в том числе при движении неоднородных сред (с переменными физическими свойствами типа масел) [13]. При этом развиты оригинальные подходы к интерпретации периодических граничных условий. Особо следует отметить развитие МВТ для расчета до-, транс-, сверх- и гиперзвуковых отрывных течений со скачками уплотнения [14]. Краткий список решенных на основе МВТ задач:

- Vortex Cell RANS для кругового цилиндра, канала и толстого профиля с вихревыми ячейками (с 1996); 2D + k - ϵ , затем MSST, 3D – канал
- сферическая лунка и пакет лунок на плоской стенке, в том числе на стенке канала (с 1999)
- прогнозирование задымленности залов метрополитена (1999)

- система прогнозирования опасного сдвига ветра (2000)
- теплообменники: пакет труб - удаленный цилиндр с периодическими граничными условиями (2003); труба с выступами (2004)
- вихревая и температурная дорожка за уединенным круговым цилиндром (с 1998), моделирование движения неоднородных сред типа масел
- циклонный анализатор паров ртути (2002)
- расчеты на скользящих сетках: вращение мешалки в стакане и колебания маятника в вязкой жидкости (с 2003)
- сжимаемые течения со скачками уплотнения и теплообмен при взаимодействии скачка уплотнения с пограничным слоем, при обтекании угла сжатия, кругового цилиндра, шара и каплевидного тела (с 2004)
- вентиляция автомобильных тоннелей (с 2001)
- проектирование ветродвигателей (с 2003)
- циклические процессы вихреобразования за установленными на стенке кубом и параллелепипедом, а также при движении потока в узком канале с конической лункой (с 2006)
- строительная аэродинамика (2006).

III. ОСОБЕННОСТИ МВТ И ПАКЕТА VP2/3

Десятилетнее развитие оригинальной расчетной методологии, реализованной в пакетной среде, можно подытожить в следующем перечне отличительных особенностей.

- **обобщенная (на несжимаемые и сжимаемые течения) процедура коррекции давления SIMPLEC** в приращениях зависимых переменных на согласованных централизованных сетках; трактовка подхода Рхи-Чоу с константой 0.1
- **моделирование турбулентности** в рамках MSST (2003) с учетом влияния кривизны линий тока на вихревую вязкость с дополнительной константой 0.02 в подходе Родди-Лещинера

- **оригинальные процедуры коррекции градиента давления и среднемассовой температуры** при использовании периодических граничных условий (2D и 3D)

- сочетание пристеночных функций с граничными условиями для низкорейнольдсовых моделей (по Ментеру) [13]

- **оригинальный подход** к заданию входных граничных условий на основе предварительного решения погранслошной задачи, позволяющий избежать типичных скачков в решениях, характерных для фиксированных профилей скорости типа 1/7

- **оригинальный подход к трактовке циклических процессов** на основе осреднения полей, рассчитанных на периоде колебаний поперечной интегральной нагрузки

- **автоматизированная интерактивная процедура согласования простых топологии накладываемых с пересечением структурированных сеток**, в том числе подвижных, настроенных на отображение многосвязных областей и разномасштабных характерных особенностей течения. Данный подход эквивалентен использованию адаптивных неструктурированных сеток, но отличается от него существенно меньшими вычислительными ресурсами, т.е. более экономичен. Он также обеспечивает надлежащую точность без измельчения сеток, т.к. автоматически разрешает масштабы уловленных гидродинамических особенностей

- **повышение вычислительной эффективности** при перезаписи из DELPY в C++

- **распараллеливание MBT** в рамках систем с распределенной памятью (MPI) под WINDOWS и LINUX.

IV. ВЕРИФИКАЦИЯ MBT И VP2/3

Тестирование многопрофильного пакета VP2/3 проведено на комплексе задач, имеющих физические аналоги. При этом численные прогнозы сопоставляются не только с данными имеющихся экспериментов, но и с результатами специально выполненных испытаний на лабораторных установках ИМ

МГУ, МГТУ им. Н.Э.Баумана, СПбГПУ, ФТИ им. А.Ф.Иоффе, ИТФ СО РАН и др. Отдельно следует отметить сравнительный анализ результатов, полученных с помощью различных пакетов (VP2/3 и Fluent).

MBT-VP2/3 протестированы при моделировании ламинарных отрывных течений на задачах двумерного обтекания маслом пакета труб (сравнение с экспериментами Жукаускаса) и пространственного обтекания сферической лунки на плоской стенке (эксперимент Рабиновича в гидротрубе).

Обширные методические исследования посвящены обоснованию выбора, апробации и верификации модели переноса сдвиговых напряжений (MSST). В расчетах циркуляционного стационарного турбулентного течения в квадратной каверне при $Re=5 \times 10^4$ детально анализируются различные полуэмпирические модели турбулентности, сеточные структуры и пакеты (VP2/3 и Fluent). Результаты численных прогнозов сравниваются с экспериментальными данными Майлза. Показано существенное преимущество моделей MSST (образца 1993г) и SA (модифицированная версия) над моделями семейства $k-\epsilon$ и моделью V2F.

Подробно рассматривается нестационарное турбулентное обтекание кругового цилиндра в до- и закритическом режимах. В целом, на основе сравнения с многочисленными экспериментальными и расчетными данными по интегральным и локальным силовым нагрузкам (Игараши, Рошко, Бычков и др.) подтверждаются выводы об адекватности моделей MSST и SA, а также приемлемость двумерного подхода к интерпретации вихревых процессов. Апробирована предложенная процедура анализа характеристик автоколебательного режима при их осреднении на периоде колебаний подъемной силы. В дальнейшем он был успешно применен для интерпретации пространственных циклических процессов.

Адекватность MSST была также подтверждена при решении задач конвективного

теплообмена при автоколебательном режиме обтекания кругового цилиндра (сравнение с экспериментами Накамура, Сапожникова) и стационарном обтекании неглубокой лунки на плоской стенке (эксперимент Сапожникова).

Широкий круг тестовых расчетов с использованием MSST (версия 1993г) был выполнен для задач турбулентного обтекания траншей и лунок на плоской стенке, круговой каверны на стенке плоскопараллельного и расширяющегося канала. Продемонстрировано хорошее согласие численных прогнозов с экспериментальными данными Леонтьева, Чудновского, Кикнадзе, Дрейцера, Чоу, Готовского, Гувернюка, Зубина и др. Также сравниваются результаты расчетов течения и теплообмена около глубокой сферической лунки, полученные с помощью MBT-VP2/3 и использования адаптивных сеток (Fluent). Показано их хорошее согласие, но при этом вычислительная эффективность MBT оказывается гораздо выше.

Новая модель MSST [13] прошла детальное тестирование на многочисленных примерах турбулентных отрывных течений в квадратных и круговых кавернах с подвижной крышкой и на стенке каналов (как рассмотренных ранее, так и взятых из монографии Чжена). Доказана необходимость коррекции этой модели с учетом влияния кривизны линий тока на характеристики турбулентности, поскольку в ядре крупномасштабного вихря накапливается ложная турбулентная вязкость. В отличие от моделей типа $k-\epsilon$, для которых величина дополнительной константы C_c принята равной 0.1, показано, что для MSST эта величина должна быть меньше ($C_c=0.02$).

Применение луночных технологий для обеспечения теплозащиты поверхности фюзеляжа самолета-носителя при транспортировке искусственного спутника Земли на околоземную орбиту стимулировало разработку новой версии VP2/3 для моделирования сверхзвукового обтекания сжимаемым вяз-

ким газом поверхности с нанесенным луночным рельефом. Обобщенная процедура коррекции давления и модель MSST были оттестированы на классических задачах о взаимодействии падающей ударной волны с пограничным слоем и обтекания угла сжатия (сравнение с экспериментами Хорстмена).

Однако пристеночные турбулентные течения с косыми скачками уплотнения вблизи криволинейных рельефов оказалось легче рассчитать, чем обтекание затупленных тел, для которых характерны прямые скачки высокой интенсивности. Тестовые исследования обтекания классических тел типа цилиндра, шара, каплевидного тела показали, что уравнение энергии следует записывать относительно полного теплосодержания, а для дискретизации членов уравнений использовать схему Ван-Лиры, в том числе для определения плотности на гранях контрольного объема.

В [14] показана приемлемость подхода URANS, реализованного в параллельном пакете VP2/3 и основанного на использовании MBT в сочетании с модифицированной новейшей MSST ($C_c=0.02$).

V. Фундаментальные проекты

Два перспективных научных направления современной аэрогидромеханики тесно связаны с развитием MBT и пакета VP2/3. Один из них, берущий свое начало в 1992г, посвящен численному исследованию физического механизма смерчевой интенсификации теплообмена при обтекании траншейных и луночных рельефов. Здесь анализируются только “ударные” результаты, которые могли быть получены в основном методами численного моделирования.

- *Струйно-вихревая природа интенсификации теплообмена.* Идентификация струйно-вихревых структур пространственных отрывных течений, проведенная методами компьютерной визуализации в пристеночном слое около сферической лунки, выявила самоорганизацию на ее боковых склонах

смерчеобразных струй, взаимодействующих с образованием симметричной картины с двумя вихревыми ячейками или несимметричной структуры с формированием монотонного режима течения в лунке. Смерчеобразные закрученные струйные потоки начинаются в особых точках типа фокус на картине растекания жидкости по криволинейной стенке [15].

- *Карты режимов.* Формирующиеся режимы обтекания лунки и совокупности лунок определяются большим количеством геометрических и режимных параметров, основными из которых в случае сферической лунки являются ее глубина, радиус скругления кромки, радиус кривизны образующей контура (в долях диаметра “пятна”), высота и ширина канала, число Рейнольдса, степень и масштаб турбулентности внешнего потока. Таким образом, задача проектирования рационального по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению рельефа является многопараметрической. В первую очередь анализируется влияние вязкости и глубины сферической лунки на структуру ее обтекания [16].

- *Бифуркация вихревой структуры течения и скачкообразный прирост теплоотдачи в ареале глубокой сферической лунки.* Один из замечательных результатов численного моделирования связан с обнаружением перестройки картины отрывного течения от симметричной к монотонной при увеличении глубины сферической лунки, обуславливающей скачкообразный рост теплоотдачи внутри лунки и в следе за ней.

- *Преимущество лунок над траншеями.* Пространственный характер течения в следе за лункой определяет более высокие темпы роста теплоотдачи по сравнению с траншеей.

- *Обоснование теплогидравлической эффективности сферической лунки на стенке узкого канала.* Особенность лунок как вихревых интенсификаторов теплообмена состоит в том, что они не приводят к заметному росту гидравлических потерь. Для узкого канала показано, что теплоотдача от ареала со

сферической лункой возрастает темпом, опережающим увеличение гидравлических потерь, т.е. их теплогидравлическая эффективность больше единицы (на 16%).

- *Эффект синхронизации вихрей в пристеночном слое около рельефа из упорядоченных лунок.* Анализ картин растекания жидкости по стенке с пакетом упорядоченных лунок указывает на согласованность вихревых структур в пристеночном слое, причем по мере увеличения луночных рядов наблюдается мультипликационный эффект нарастания теплоотдачи.

- *Конструирование траншейных лунок, обладающих повышенной теплоотдачей по сравнению со сферическими аналогами.* Поскольку монотонные режимы обтекания глубоких сферических лунок оказываются предпочтительными по теплоотдаче от стенки, сконструированы формы лунок, генерирующих такие вихревые структуры. Предлагаются овальные лунки, представляющие две разнесенные половинки сферической лунки, соединенные цилиндрической вставкой. Помимо длины вставки L вводится еще один геометрический параметр – угол наклона продольной оси лунки по отношению к набегающему потоку φ . Таким образом, расширяется набор параметров для оптимизации луночных рельефов. Показано, что овальные лунки имеют значительные преимущества перед сферическими аналогами по тепловой и теплогидравлической эффективности [17].

- *Эффективное скругление кромки лунки.* Кикнадзе, говоря о лунках с двойной кривизной, имел в виду радиус скругления кромки. В численных исследованиях показано, что при сохранении неизменным радиуса кривизны центральной части сферической лунки увеличение скругления кромки приводит к возрастанию теплоотдачи при одновременном снижении гидравлических потерь. Таким образом, лунки со скругленной кромкой обладают большей тепловой и теплогидравлической эффективностью по сравнению с острокромочными.

- *Тепловое проектирование луночных рельефов. Их предельные характеристики.* Тепловое проектирование луночных рельефов предлагается проводить на основе использования зигзагообразных овальных лунок со сглаженными краями. Анализируются предельные теплогидравлические характеристики при рассмотрении периодического расчетного модуля, на границах которого задаются периодические граничные условия.

Еще один фундаментальный проект связан с управлением обтеканием тел с помощью вихревых ячеек. Как ранее указывалось, развитие МВТ и пакета VP2/3 в значительной мере обязано его успешной разработке.

- *Идея вихревой ячейки (ВЯ).* Под ВЯ в рамках обобщенной концепции понимаются каверны, траншеи, лунки, зазоры между разновеликими телами, в том числе с вмонтированными в них центральными телами. Рассматриваются как пассивные, так и активные ВЯ, в последних из которых на циркулирующий в ячейках поток оказывается энергетическое воздействие (с помощью отсоса или движения части омываемого контура, в том числе вращения центрального тела).

- *Способы интенсификации возвратного течения в ВЯ.* Топологически формализованная конфигурация ВЯ с заданным эллиптическим контуром и вписанным в него центральным телом (ЦТ), форма которого может быть согласованной и несогласованной с выбранным контуром ячейки. Центральное тело служит для реализации механизма интенсификации циркулирующего в ячейке потока, при этом используется либо хорошо известный способ распределенного по поверхности отсоса, либо в случае цилиндрического тела его закрутка с постоянной угловой скоростью. Центральное тело может быть изъято и тогда интенсификация потока в ячейке производится за счет сосредоточенного (щелевого) отсоса или теоретически с помощью движения участка контура. В качестве параметра воздействия на циркулирую-

щий поток выбирается скорость отсоса или при вращении ЦТ касательная скорость на поверхности цилиндра в долях скорости набегающего потока, а в качестве интегрального управляющего фактора выступает коэффициент расхода C_d , обезразмеренный по характерным масштабам скорости и длины.

- *Учет энергетического воздействия.* Эффективность энергозатратного метода управления обтеканием тел с помощью ВЯ оценивается с помощью введения дополнительного сопротивления, определяемого мощностью, потребной для реализации распределенного или сосредоточенного отсоса, а также вращения ЦТ.

- *Размещение ВЯ на объекте.* ВЯ монтируется в выбранном объекте (в качестве теста рассмотрен цилиндр при симметричном режиме обтекания). ВЯ может быть несколько. Их размеры подбираются эмпирически, хотя они составляют малые доли от характерных масштабов тел. К геометрическим параметрам ВЯ добавляются размеры окна и координаты его центра на контуре тела, а также радиусы скругления переходов от контура ячейки к образующей тела. Таким образом, формируется омываемая поверхность тела с криволинейными пазами – ВЯ. ВЯ целесообразно располагать в окрестности мест отрыва на контуре тела. Цель функционирования системы ВЯ – изменение картины обтекания тела и, как следствие, улучшение его аэродинамических характеристик.

- *Физический механизм управления с помощью ВЯ.* Пассивные ВЯ неэффективны. Максимальная скорость возвратного потока в них не превышает 50% от скорости невозмущенного потока. В активных ВЯ скорость циркулирующего потока одного порядка и выше скорости внешнего течения.

- *Снижение лобового сопротивления тел с ВЯ.* Расположение активных ВЯ на контуре кругового цилиндра позволяет уменьшить длину отрывной зоны в следе и снизить лобовое сопротивление вдвое. Скругление

задней острой кромки контура ВЯ способно уменьшить его величину примерно на 10%.

- *Увеличение подъемной силы и повышение аэродинамического качества.* Для толстых профилей, характерных для летательных аппаратов интегральной компоновки (ЭКИП), расположение на тыльной стороне системы активных ВЯ приводит к практически безотрывному их обтеканию. Су достигает величин порядка 2.5, а аэродинамическое качество превышает 20. Обнаружен эффект суперциркуляции, т.е. создания дополнительной подъемной силы непосредственно в ВЯ.

- *Сравнение толстых профилей.* Обнаружена эквивалентность по аэродинамическому качеству (порядка 20) толстого профиля аппарата ЭКИП и равного по толщине геттингеновского профиля при одинаковом коэффициенте расхода отсасываемого в вихревых ячейках воздуха (C_q порядка 0.02) [19].

- *Влияние угла атаки.* Для толстого профиля с вихревыми ячейками достигнут высокий уровень коэффициента подъемной силы – $C_y > 1$ в широком диапазоне углов атаки от -30° до 25° .

- *Влияние сжимаемости.* Показано существование критических чисел Маха набегающего потока, при которых наблюдаются кризисные явления при обтекании тел с вихревыми ячейками. Их величины имеют порядок 0.4-0.5 при умеренных (0.02-0.03) коэффициентах C_q [20-21].

VI. Приложения

Несколько примеров иллюстрируют использование пакета VP2/3 для решения практических задач.

- *Автоматизированный прогностический комплекс, позволяющий моделировать орografiю местности в районе аэродрома и анализировать ее влияние на формирование режимов ветра, опасных и сложных для авиации явлений условий погоды в приземном слое атмосферы.* Такой комплекс может

стать основой эксплуатационной системы оперативной оценки критических по сдвигу ветра условий выполнения взлета – посадки воздушных судов в аэропортах, в особенности расположенных в районах со сложным рельефом. 1) Выполнено компьютерное картографирование местности на примере а/п Нальчик; 2) азработан вычислительный комплекс анализа воздушной обстановки в районе аэродрома; 3) осуществлена круговая обдувка местности а/п с учетом влияния толщины атмосферного пограничного слоя; 4) сформирован банк данных о состоянии воздушной среды в каждой точке глиссады; 5) синтезирована система предупреждения опасного влияния сдвига ветра.

- *Система прогнозирования задымленности помещений метрополитена при пожаре в вагоне поезда.* 3-х мерная CFD модель для предсказания заполнения дымом подземного зала метрополитена была развита для одно- и трехсводчатого залов со стоящим поездом при пожаре в одном из вагонов. Главной целью моделирования являлась оценка времени эвакуации пассажиров на основе анализа расчетных нестационарных полей температуры, скорости газовой среды, концентраций продуктов сгорания, оптической плотности дыма и видимости. Предложенная расходная модель продуцирования и распространения дыма была верифицирована.

- *Расчеты аэродинамики строительного комплекса “ЭКО”.* Нестационарные аэродинамические нагрузки и поле скорости при ветровом воздействии на спроектированные сооружения определены на основе решения нестационарных уравнений Рейнольдса, замкнутых с помощью модифицированной MSST. Тестирование пакета для решения задач строительной аэродинамики проведено при моделировании циклических процессов вихреобразования за установленными на стенке кубом. Расчеты обтекания комплекса зданий “ЭКО” показывают отсутствие крупных устойчивых по направлениям ветра застойных зон с большой степенью затормо-

женности, что свидетельствует об удовлетворительной «проветриваемости» комплекса.

vii. Заключение

Представленная разработка МВТ и пакета VP2/3 иллюстрирует наличие большого ресурса CFD для решения фундаментальных и прикладных проблем аэрогидромеханики и теплофизики. По-прежнему, значительное внимание будет уделяться методическим, тестовым экспериментам, причем акцент будет перенесен на объединение подходов численного и физического моделирования. Перспективы дальнейшего развития также видятся в сфере увеличения вычислительной эффективности пакетов, что позволит выйти на решение сложных задач, в частности сопряженных задач и задач аэроакустики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №№08-01-00059).

Литература

- [1] Сполдинг Б. Вычислительная гидродинамика (CFD): прошлое, настоящее и будущее / Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева “Проблемы газодинамики и тепло-массообмена в энергетических установках”. - М.: Издательский дом МЭИ. - 2007. - Т.1. - С.9–13.
- [2] Белов И.А., Гинзбург И.П., Исаев С.А. Движение и теплообмен в замкнутой области при наличии подвижных границ // Вестник ЛГУ. 1976. - №13. - С.41–50.
- [3] Белов И.А., Исаев С.А. Циркуляционное движение жидкости в прямоугольной каверне при средних и высоких числах Рейнольдса // Журнал прикладной и технической физики. - 1981. - №1. - С. 41–45.
- [4] Исаев С.А. О влиянии аппроксимационной вязкости при расчете турбулентных течений с циркуляционными зонами // Инженерно-физический журнал. - 1985. - Т.48. - №6. - С. 918–921.
- [5] Белов И.А., Кудрявцев Н.А. Теплопередача и сопротивление пакетов труб. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. - 223с.
- [6] Белов И.А., Исаев С.А., Коробков В.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости. - Л.: Судостроение, 1989. - 256 с.
- [7] Белов И.А., Исаев С.А., Коновалов В.Н., Митин А.Ю. Применение концепции идеальной жидкости для расчета отрывного обтекания заглушенных тел с учетом турбулентного сдвигового слоя на границе области отрыва // Письма в Журнал технической физики. - 1984. - Т.10. - Вып.20. - С. 1217–1220.
- [8] Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений. Учебное пособие. - СПб: БГТУ, 2001. - 107 с.
- [9] Исаев С.А. Тестирование дифференциальных моделей турбулентности при расчете отрывных течений // Изв. АН БССР. Сер. Физ.-энерг. Наук. - 1989. - №4. - С. 57–62.
- [10] 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.
- [11] Menter F.R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper. - 1993. - №93-2906. - 21p.
- [12] Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // AIAA Paper. - 1992. - №92-0439. - 22p.
- [13] Быстров Ю.А., Исаев С.А., Кудрявцев Н.А., Леонтьев А.И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб. - СПб, Судостроение, 2005. - 398с.
- [14] Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Усачов А.Е., Стрижак С.В., Лоханский Я.К., Гувернюк С.В. Разработка, верификация и применение основанного на многоблочных вычислительных технологиях распараллеленного пакета открытого типа VP2/3 для решения фундаментальных, прикладных и эксплуатационных задач аэромеханики и теплофизики // Вестник ЮУрГУ. Серия "Математическое моделирование и программирование". - 2009. - № 17 (150). - Вып. 3. - С. 59–72.
- [15] Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I., Hassel E. Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on the turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel // Int. J. Heat Mass Transfer. - 2010. - Vol.53. - Issues 1-3. - P.178-197.
- [16] Леонтьев А.И., Исаев С.А., Садовников Г.С. Численное моделирование снижения тепловых нагрузок при сверх- и гиперзвуковом обтекании плоской стенки с нанесенными траншеями и лунками // Тепловые процессы в технике. - 2009. - №9. - С.362-366.
- [17] Исаев С.А., Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Можайский С.А., Усачов А.Е. Численный анализ влияния физической вязкости на вихревой теплообмен при ламинарном и турбулентном обтекании нагретой пластинки с неглубокой сферической лункой // Инженерно-физический журнал. - 2009. - Т.82. - №5. - С.847-857.
- [18] Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E. Vortex-jet mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples // Proc. of Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows. Berlin. - 2008. - 11p.
- [19] Исаев С.А., Баранов П.А., Судаков А.Г., Харченко В.Б. Численный анализ влияния угла атаки на турбулентное обтекание толстого геттингеновского

профиля с вихревыми ячейками // Теплофизика и аэромеханика. - 2007. - Т.14. - №2. - С.175-193.

- [20] Исаев С.А., Баранов П.А., Пригородов Ю.С., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Численный анализ влияния сжимаемости на турбулентное, симметричное обтекание вязким газом цилиндра с круговой вихревой ячейкой // Инженерно-физический журнал. - 2008. - Т.81. - №2. - С.330-337.
- [21] Баранов П.А., Исаев С.А., Судаков А.Г., Усачов А.Е. Численное моделирование турбулентного обтекания вязким газом цилиндра с круговой вихревой ячейкой при отсосе с поверхности центрального тела // Известия АН. Механика жидкости и газа. - 2007. - №6. - С.34-45.