

**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**

*С.А. Исаев, А.Г. Судаков, П.А. Баранов, А.Е. Усачов, С.В. Стрижак,
Я.К. Лоханский, С.В. Гувернюк*

**DEVELOPMENT, VERIFICATION AND APPLICATION
OF THE PARALLELED PACKAGE OF THE OPEN TYPE VP2/3 BASED
ON MULTIBANK COMPUTING TECHNOLOGIES FOR SOLVING
FUNDAMENTAL, APPLIED AND OPERATIONAL PROBLEMS
IN AEROMECHANICS AND THERMAL PHYSICS**

*S.A. Isaev, A.G. Sudakov, P.A. Baranov, A.Eu. Usachov, S.V. Strizhak,
Ja.K. Lokhansky, S.V. Guvernjuk*

Дан генезис развития многоблочных вычислительных технологий (МБТ) и пакета VP2/3 (Velocity-Pressure, 2D/3D-версии) для решения задач вихревой гидромеханики и теплообмена в рамках подхода, основанного на уравнениях NS-RANS&URANS. Особое внимание уделяется апробации модели переноса сдвиговых напряжений Ментера (MSST) применительно к расчету отрывных течений. Верификация МБТ и VP2/3 проводится на тестовых задачах, имеющих экспериментальные аналоги. Пакет применен для решения фундаментальных проблем смерчевой интенсификации теплообмена около луночных рельефов и управления обтеканием тел с вихревыми ячейками. Также прогнозируется задымление залов метрополитена при пожаре в вагоне поезда, предупреждение опасного сдвига ветра в аэропортах, обоснование решения задач строительной аэродинамики.

Ключевые слова: многоблочные вычислительные технологии, уравнения Навье – Стокса, модели турбулентности, пакет VP2/3, тестирование

The authors provide genesis of development of the multibank computing technologies (MCT) and package VP2/3 (Velocity-Pressure, 2D/3D-versions) for solving the problems of vortical hydrodynamics and heat exchange within the framework of the approach based on the equations NS-RANS&URANS. They pay special attention to the approbation of the Menter shearing stress translation model (MSST) applying to the calculation of the detached flows. The MCT and VP2/3 verifications are carried out on the basis of the test problems which have experimental analogs. The package is applied to solving the fundamental problems of tornadic heat transfer enhancement near the alveolar relief as well as to the control of flow around bodies with vortical cells. The authors also forecast fumigation of the subway halls in case of fire in the carriage, prevent of dangerous wind shift in the airports, and verify solving of building aerodynamics problems.

Keywords: multibank calculating technologies, Navier – Stokes equations, turbulence models, package VP2/3, testing

1. Введение

В области применения вычислительной техники определенно наметился ренессанс, связанный с восстановлением в научно-технических и учебных организациях крупных вычислительных центров подобно тем, которые существовали в них полтора-два десятка лет назад и были расформированы, поскольку оказались неспособными выдержать конкуренцию со стороны персональных компьютеров. В рамках национальных проектов РФ осуществляется поставка высокопроизводительных систем в ряд университетов (МГУ, ТГУ, НГУ и др.). Их стоимость составляет десятки миллионов долларов. Они ориентированы, прежде всего, на решение проблем нефтяной и газовой отрасли, нанотехнологий, производства новых лекарств, астрофизики, аэрокосмической отрасли, анализа финансовых рынков, киноиндустрии и т.д.

Современное состояние численного моделирования в актуальных областях аэромеханики и теплофизики характеризуется широким распространением коммерческих многофункциональных *CFD* – пакетов прикладных программ, которые являются продуктами эволюции первоначально исследовательских комплексов (написанных, как правило, на ФОРТРАНе) и объектно-ориентированных систем программирования. Разработка универсальных коммерческих пакетов типа *PHOENICS*, *STAR-CD*, *ANSYS*, *FLUENT*, *CFX* во многом связывается с прогрессом в персональных компьютерах и их широким использованием, в том числе в распараллеленных версиях. На определенном этапе развития вычислительной гидродинамики указанные пакеты, безусловно, сыграли положительную роль. Однако сейчас все заметнее их тормозящее влияние на развитие численных исследований особенно в научной и учебной сферах. Причины лежат не только в сложившемся монополизме производителей пакетов и закрытости их «ядра». Главное – «несвободность» пакетных технологий. Это признают даже основатели *CFD* и классики пакетных технологий, такие как Д. Сполдинг.

Альтернатива коммерческим пакетам заключается в развитии системы открытых пакетов, подобных *OPEN FOAM (Field Operation and Manipulation)*. Разработчиком указанного пакета является ученик А. Госмена Н. Jasak. Очевидно, что сохраняются общими структура пакета, его наполнение каталогами математических моделей. Однако методические элементы имеют особенности. Тем более важно обеспечить свободный доступ к ним и осознанный подход пользователя к решению стоящих перед ним проблем. Последнее может осуществляться через интернет-сайты, однако важную роль также играют семинары и конференции по проблемам открытых пакетов, где возможны прямые контакты с разработчиками. Представляется актуальным, в дополнение к текущим национальным проектам по поставке оборудования, не упустить вопросы создания отечественного программного обеспечения.

За последние десятилетия в РФ созданы и успешно развиваются специализированные программные комплексы, не уступающие по ряду характеристик зарубежным аналогам. Это известные пакеты *FlowVision*, *SINF*, *VP2/3*, *GDT* и многие другие. Имеются успешные разработки в области создания эффективных математических моделей, например, *DES* М.Х. Стрельца, модели многофазных сред Л.И. Зайчика и А.Н. Осипцова. Также значительны продвижения в сфере создания новых численных схем. В работе сделан акцент на оригинальных многоблочных вычислительных технологиях (*VP2/3*).

2. Расчетная методология

Вычислительная гидродинамика (*CFD*) – наука, рожденная в результате соединения вычислительных методов (прикладной математики) и математических моделей гидромеханики, претерпела стремительное развитие в 20 веке, прежде всего, благодаря бурному прогрессу вычислительной техники (компьютеров), и практически сформировалась при

жизни одного поколения исследователей. В своей лекции на школе А.И. Леонтьева один из родоначальников *CFD* Б. Сполдинг отметил важность разработки метода контрольного объема для решения исходных уравнений для описания гидродинамических процессов – упрощенных и полных уравнений Навье – Стокса. Причем, 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. 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 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 и была решена с помощью дискретизации конвективных членов уравнений противопоточной схемы с квадратичной интерполяцией Леонарда, а также за счет адаптации сетки под сдвиговые слои на границе отрывной зоны.

В 70 – 90-е гг. широко использовался подход, когда осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса замыкались с помощью двухпараметрической диссипативной модели турбулентности – $k - \epsilon$ – модели Лаундера – Сполдинга. При расчете течений с крупномасштабными вихрями для уточнения влияния кривизны линий тока на характеристики турбулентности применялись различные поправки, одна из которых, следуя Роди – Лещинеру, представляла собой функцию f_c от турбулентного числа Ричардсона Ri_t с дополнительной полуэмпирической константой C_c [$f_c=1/(1+Ri_t)$], на которую умножался коэффициент турбулентной вязкости μ_t . При решении тестовых задач о течении в квадратной каверне, обтекания диска и композиции диска и цилиндра показано, что выбор величины $C_c=0,1$ обеспечивает наилучшее согласование расчетных и экспериментальных данных. Также была 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 [1]. 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.

3. Генезис МВТ

Индустриальный этап развития *CFD* связан с разработкой продуктов – пакетов прикладных программ, коммерческих, универсальных и некоммерческих, как правило, специализированных. Среди первых из них, прежде всего, следует отметить зарубежные разработки, начало которым положил сполдинговский *PHOENICS*, а наибольшую известность snискали *FLUENT*, *CFX*, *FIDAP*. Из отечественных пакетов, в основном ориентированных на решение конкретных задач, можно указать *FlowVision* Аксенова, *GasDynamics Tools* Зибарова и *SINF* Смирнова. Конечно, по объемам продаж пакеты первой волны не идут ни в какое сравнение со вторыми. Однако все пакеты объединяет общность структуры, включающей препроцессор, решатель и постпроцессор. Много общего можно найти в реализации расчетных процедур, хотя они, как правило, 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 [2] 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 МВТ, реализованных в специализированном пакете прикладных программ *VP2/3* [3]. 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 раз-

мещения 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 Менгера (*MSST*) и модель вихревой вязкости Спаларта – Аллмареса (*SA*). Наложённая мелкая сетка в ближнем следе за круговым цилиндром способствовала надлежащему разрешению нестационарной вихревой дорожки Кармана. Особое внимание уделяется воспроизводству 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) особенностью течения (поля характеристик), настройка ее на соответствующий масштаб осуществляются в ходе получения предварительного решения. Важная 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 [3] 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). 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. Краткий список решенных на основе МВТ задач:

- *Vortex Cell RANS* для кругового цилиндра, канала и толстого профиля с вихревыми ячейками (с 1996); $2D + k - \epsilon$, 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.

4. Особенности МВТ, верификация и применение *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 центрированных 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 Роди – Лещинера;
- оригинальные процедуры коррекции градиента давления и среднemasсовой температуры при использовании периодических граничных условий (*2D* и *3D*);
- сочетание пристеночных функций с граничными условиями для низкорейнольдсовых моделей (по Ментеру);
- оригинальный подход к заданию согласованных входных граничных условий на основе предварительного решения погранслойной 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 по 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 *DELPHY* в *C++*;
- распараллеливание МВТ в рамках систем с распределенной памятью (*MPI*) под *WINDOWS* и *LINUX*.

История *CFD* демонстрирует развитие двух тенденций в области создания новых вычислительных платформ. С одной стороны, прогресс идет в направлении роста производительности процессоров, что выражается в появлении однопроцессорных супер-компьютеров (ранее супер-ЭВМ) на новой элементной базе. А с другой стороны, развивается концепция распараллеливания вычислений, которая сегодня нашла отражение в двух-четырёх-восьми ядерных процессорах, а также ранее в транспьютерных, а сейчас в многопроцессорных вычислительных комплексах. Каждая из тенденций имеет свои преимущества. Однако, если раньше параллельные комплексы были не слишком доступными, а решением задач на них занимался очень узкий круг исследователей, то в настоящее время параллельные вычисления становятся массовыми благодаря широкому распространению «комнатных» кластеров. В этой связи параллельное программное обеспечение становится необходимым. Следует отметить, что рост вычислительной эффективности при этом позволяет перейти к расчету трехмерных нестационарных течений, моделирование которых на однопроцессорных машинах занимало порядка нескольких месяцев, а сейчас требует несколько дней.

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*).

Традиционно большое внимание уделяется решению классической тестовой задачи о циркуляционном ламинарном течении в квадратной каверне с подвижной крышкой при высоких числах Рейнольдса. Расчеты стационарных вихревых структур проведены до $Re=5 \times 10^4$, причем показано, что гипотеза Бэтчелора о формировании в каверне крупномасштабного вихря, окруженного тонким пограничным слоем, не вполне справедлива, хотя интенсивность вихря с ростом Re стремится к асимптотическому значению. В угловых зонах каверны возникают множественные вторичные вихри, играющие роль направляющих, причем их развитие происходит даже при $Re > 10^4$. Решение трехмерной задачи о движении в траншее квадратного сечения с подвижной крышкой позволило обнаружить существование кластеризованных по поперечной координате вихревых структур, начиная с $Re=1500$.

Развитие течения в ближнем следе за цилиндром при его внезапном старте давно представляет тестовую задачу для расчетчиков. К тому же это нашло отражение в атласе фотографий Ван-Дайка, представляющем большой методический интерес и часто используемым для сравнения. В [4] вихревая дорожка за круговым цилиндром рассчитывается при $Re=140$, причем детально сопоставляются результаты решения с использованием пакетов *VP2/3* и *Fluent*, а также картины из атласа Ван-Дайка. Показана эквивалентность развития полей завихренности и концентраций дыма, а также поля температуры. Применение МВТ – *VP2/3* для моделирования ламинарных отрывных течений неоднородных жидкостей протестировано на задачах двумерного обтекания маслом пакета труб (сравнение с экспериментами Жукаускаса) и пространственного обтекания сферической лунки на плоской стенке (эксперимент Рабиновича в гидротрубе).

Следующий крупный верификационный блок посвящен обоснованию выбора, апробации и верификации модели переноса сдвиговых напряжений (*MSST*). В исследовании [4] 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 1993 г.) и *SA* (модифицированная версия) над моделями семейства $k - \epsilon$ и моделью *V2F*. Также в [4] 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 (Игараша, 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 1993 г.) был выполнен для задач турбулентного обтекания траншей и лунок на плоской стенке, круговой каверны на стенке плоскопараллельного и расширяющегося канала [2]. Продемонстрировано хорошее согласие численных прогнозов с экспериментальными данными Леонтьева, Чудновского, Кикнадзе, Дрейцера, Чоу, Готовского, Гувернюка, Зубина и др. В [4] сравниваются результаты расчетов течения и теплообмена около глубокой сферической лунки, полученные с помощью МВТ – *VP2/3* и использования адаптивных сеток (*Fluent*). Показано их хорошее согласие, но при этом вычислительная эффективность МВТ оказывается гораздо выше.

Новая модель *MSST* прошла детальное тестирование в докторской диссертации Харченко В.Б. [5]. 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) была 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 фонаря самолета-носителя при транспортировке искусственного спутника Земли на околоземную орбиту стимулировало разработку новой версии *VP2/3* для моделирования сверхзвукового обтекания сжимаемым вязким газом поверхности с нанесенным луночным рельефом [6]. 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), сверхзвукового обтекания шара, цилиндра, затупленного конуса, каплевидного тела (эксперименты ЦАГИ, ИМ МГУ, ФТИ им.А.Ф. Иоффе) .

Сравнение на рис. 1 рассчитанных и экспериментальных ударно-волновых картин обтекания шара при различных числах Маха и Рейнольдса демонстрирует приемлемое прогнозирование расположения скачков, в том числе слабых, висячих и хвостовых, отрывных зон, причем турбулентность проявляется только в следе за шаром, а ударные волны распространяются в невязкой области течения.

Обтекание кубика на стенке – это тестовая задача, входящая во все каталоги (например, в *ECCOMAS*). Данные по его нестационарному турбулентному обтеканию служат для анализа адекватности численных подходов *RANS*, *URANS*, *LES*, *DES*. Однако многообразие экспериментов, выполненных в разных условиях, не всегда учитывается расчетчиками. В данной работе выполнен численный тест по классическому физическому эксперименту Тропеа и Мартинуцци [5] (диссертация последнего 1992). Куб находится в узком канале между параллельными стенками. На основе параллельного решателя *VP2/3* рассчитывается выход

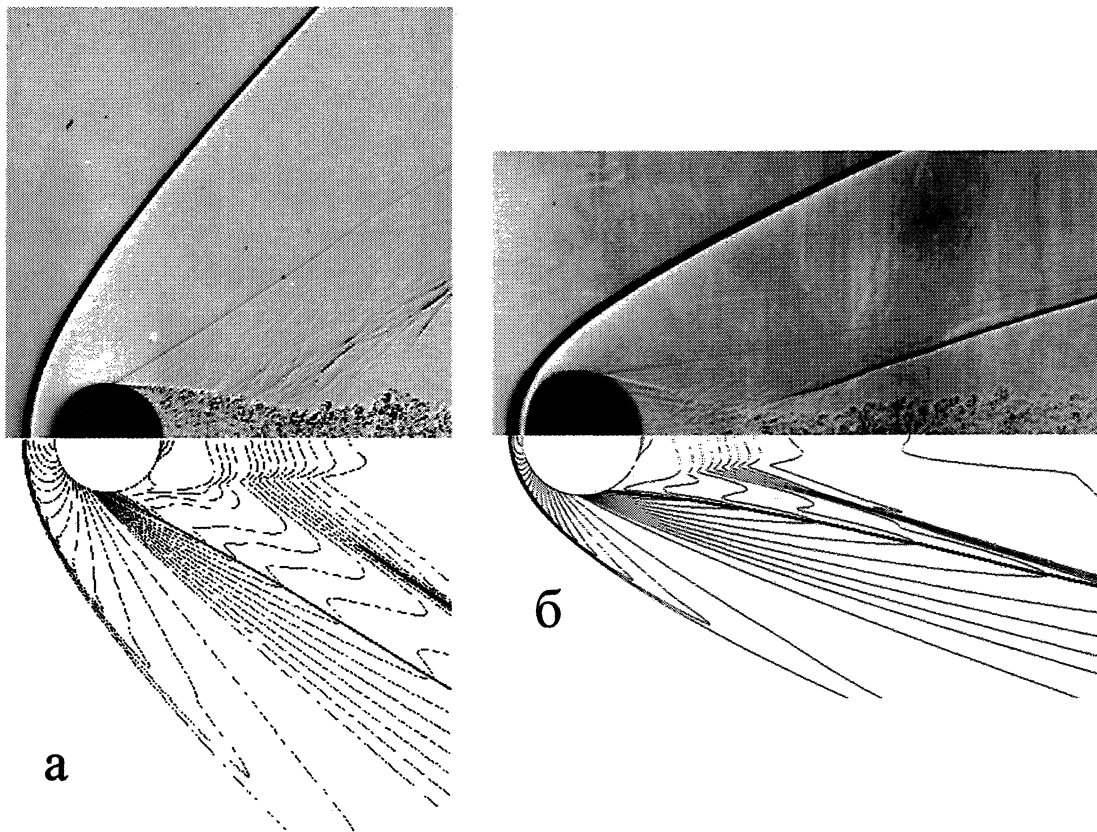


Рис. 1. Сравнение расчетных и экспериментальных (из атласа Ван-Дайка) ударно-волновых картин обтекания шара при $M=1,53$; $Re=10^5$ (а) и $M=3$; $Re=10^6$ (б)

течения в канале на автоколебательный режим при $Re=10^5$. Возникает сложный циклический процесс вихреобразования, аналогичный вихревой дорожке Кармана за цилиндром. Осредняя по периоду колебаний поперечной силы, действующей на кубик ($St=0,108$), получаем симметричные картины распределений давления спереди и сзади кубика. Профили продольной составляющей скорости удовлетворительно согласуются с данными экспериментов (рис. 2).

Расчитанные и измеренные по сажемазляным картинам положения точек отрыва и присоединения потока хорошо согласуются между собой. Над кубом и за ним имеет место разрежение, вызывающее сильное возвратное течение. Интенсивная турбулизация происходит в вихревых структурах перед кубом и в сдвиговом слое над ним. Рассчитанное давление неплохо согласуется с экспериментами величинами (рис. 3).

Два перспективных научных направления современной аэрогидромеханики и теплообмена тесно связаны с развитием МВТ и пакета *VP2/3*. Один из них, берущий свое начало в 1992 г., посвящен численному исследованию физического механизма смерчевой интенсификации теплообмена при обтекании траншейных и луночных рельефов [4].

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 несиммет-

ричной 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.

- *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 [4] анализируется влияние вязкости и глубины сферической лунки на структуру ее обтекания.

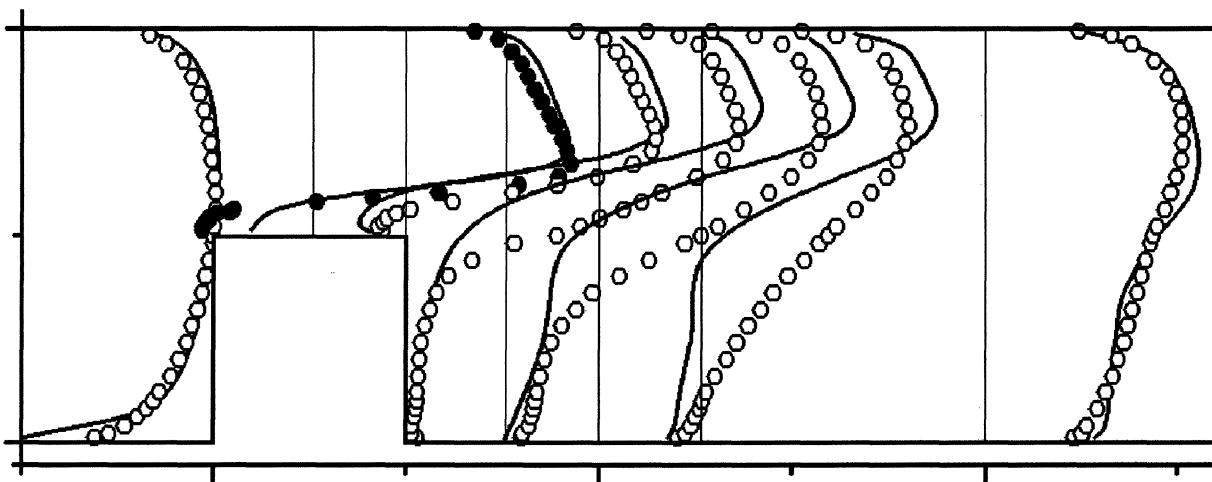


Рис. 2. Сопоставление расчетных и экспериментальных профилей продольной составляющей скорости в срединном сечении канала

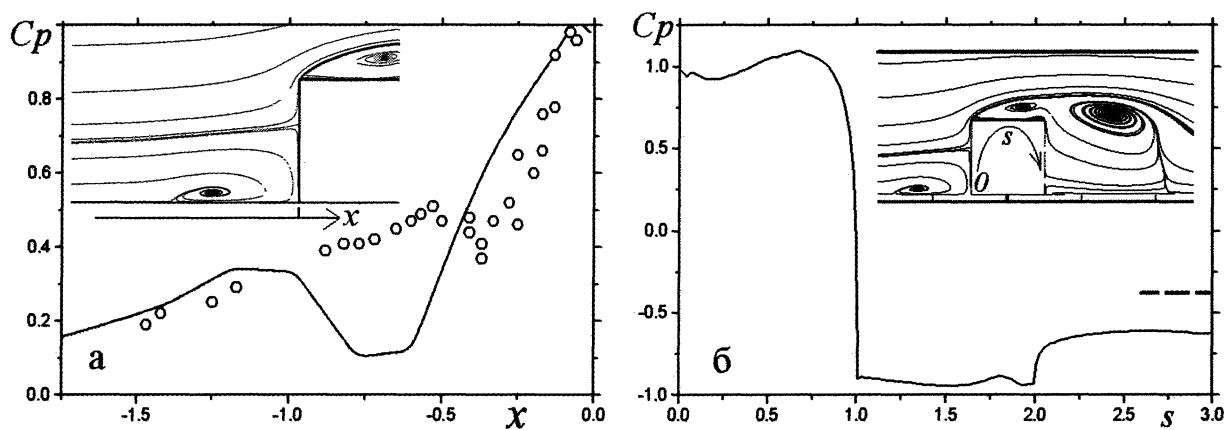


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных, осредненных по периоду колебаний поперечной силы, распределений коэффициента давления перед кубиком (а) и по его контуру (б) в срединной плоскости канала

- *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 моносмерчевой 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 моносмерчевые режимы обтекания глубоких сферических лунок оказываются предпочтительными по теплоотдаче от стенки, сконструированы формы лунок, генерирующих такие вихревые структуры. В [4] предлагаются траншейные 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. В [5] показано, что траншейные лунки имеют значительные преимущества перед сферическими аналогами по тепловой и теплогидравлической эффективности.
- *Эффективное скругление кромки лунки.* Кикнадзе, говоря о лунках с двойной кривизной, имел в виду радиус скругления кромки. В численных исследованиях [5] 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 траншейных лунок со сглаженными краями. Анализируются предельные теплогидравлические характеристики при рассмотрении периодического расчетного модуля, на границах которого задаются периодические граничные условия [4].

Второй десятилетний фундаментальный проект, связанный с управлением обтеканием тел с помощью вихревых ячеек [3], получил развитие в проекте Еврокомиссии (*VortexCell2050*).

- *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 формализована 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 циркулирующий 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_q , обезразмеренный по характерным масштабам скорости и длины.
- *Учет энергетического воздействия.* Эффективность энергос затратного 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).
- *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 .

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. В [7] 1) выполнено компьютерное картографирование местности на примере а/п Нальчик; 2) разработан 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. В [9] предложенная расходная модель продуцирования и распространения дыма была верифицирована.
- *Расчеты аэродинамики высоток 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* [9]. Тестирование пакета для решения задач строительной аэродинамики проведено при моделировании циклических процессов вихреобразования за установленным на стенке кубом. Расчеты обтекания комплекса зданий «ЭКО» показывают отсутствие крупных устойчивых по направлениям ветра застойных зон с большой степенью заторможенности, что свидетельствует об удовлетворительной «проветриваемости» комплекса.

5. 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 уделяется методическим, тестовым экспериментам, причем акцент переносится на объединение подходов численного и физического моделирования. Перспективы дальнейшего развития 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 (проекты № № 08-01-00059, 08-08-00065 и 08-08-90001) и Евросоюза по программе Framework-6 (проект VortexCell2050). Статья рекомендована к печати программным комитетом международной научной конференции «Параллельные вычислительные технологии 2009».

Литература

1. Белов, И.А. Задачи и методы расчета отрывных течений несжимаемой жидкости / И.А. Белов, С.А. Исаев, В.А. Коробков. – Л.: Судостроение, 1989. – 256 с.
2. Белов, И.А. Теплопередача и сопротивление пакетов труб несжимаемой жидкости / И.А. Белов, Н.А. Кудрявцев. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 223 с.
3. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование). – М.: МГУ, 2003. – 360 с.
4. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб несжимаемой жидкости / Ю.А. Быстров, С.А. Исаев, Н.А. Кудрявцев, А.И. Леонтьев. – СПб., Судостроение, 2005. – 398 с.
5. Харченко, В.Б. Численное моделирование отрывных течений с вихревыми и струйными генераторами на основе многоблочных вычислительных технологий: автореф. дис.... д-ра...техн. наук / В.Б. Харченко. – СПб.: СПбМГТУ, 2006. – 33 с.
6. Numerical simulation of sub-, trans- and supersonic flow around bodies with vortex cells in the framework of multiblock computational technologies / S.A. Isaev, A.G. Sudakov, A.E. Usachov, P.A. Baranov // Proceedings of West – East High Speed Flow Field Conf. – Moscow, 2007. – 6 p.
7. Сдвиг ветра в летной эксплуатации (система оповещения) / В.В. Бабаскин, С.А. Исаев, Х.Т. Метов, и др. – СПб.: Акад. гражд. авиации, 2002. – 146 с.
8. Численное и физическое моделирование температурного режима в путевом тоннеле метрополитена при пожаре в движущемся вагоне поезда / П.А. Баранов, А.Д. Голиков, С.А. Исаев, А.Ю. Снегирев // Инженер.-физ. журнал. – 2000. Т.73, № 5. – С. 918 – 921.
9. 10-летний опыт развития многоблочных вычислительных технологий в пакете *VP2/3* применительно к решению задач аэрогидромеханики и теплообмена / С.А. Исаев, П.А. Баранов, Н.А. Кудрявцев, и др. // Актуальные аспекты физико-механических исследований. Механика. – Киев: Наук. Думка, 2007. – С.116 – 134.

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Институт механики Московского государственного университета, Московский государственный индустриальный университет, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Центральный аэрогидродинамический институт (Московский комплекс)
lohsky@msiu.ru

Поступила в редакцию 2 марта 2009 г.