

# Многооблачные вычислительные технологии решения задач аэромеханики и теплофизики



## 25 Многооблачные вычислительные технологии решения задач аэромеханики и теплофизики

В коммерческих cfd-пакетах, таких как FLUENT, CFX, STAR CD, FLOW VISION, равно как и в открытых кодах Open FOAM, генерирование сеточных структур с обеспечением профессиональных требований к уровню разрешения в окрестностях особенностей термогидродинамических полей во многих случаях представляет серьезную проблему. В разрабатываемом специализированном пакете VP2/3 реализован подход, основанный на применении разномасштабных перекрывающихся сеток простой топологии, что обеспечивает ряд преимуществ соответствующей многоблочной вычислительной технологии.

### АВТОРЫ:

**С.В. Гувернюк** – зам. директора по НИР НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова, канд. физ.-мат. наук,  
e-mail: guv@mail.ru

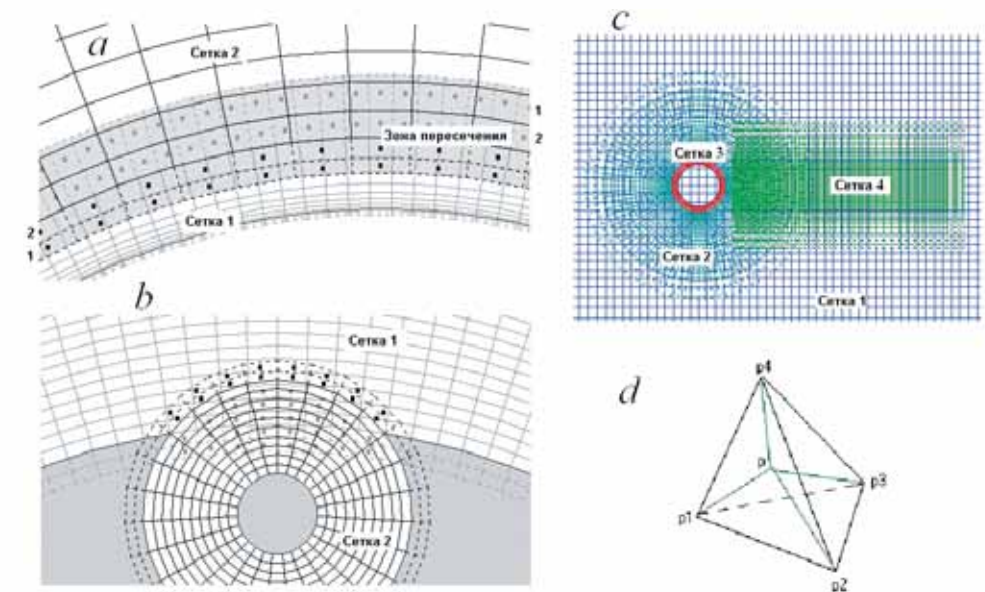
**С.А. Исаев** – профессор Санкт-Петербургского гос. ун-та гражданской авиации, докт. физ.-мат. наук,  
e-mail: isaev3612@yandex.ru

**А.Г. Судаков** – генеральный конструктор ОАО АК «Ригель», докт. тех. наук,  
e-mail: sudakov@mail.tsu.ru

**П.А. Баранов** – научный сотрудник ОАО АК «Ригель»,  
e-mail: paul\_baranov@yandex.ru

**А.Е. Усачов** – ведущий научный сотрудник Московского комплекса ЦАГИ, канд. физ.-мат. наук,  
e-mail: usachov\_a@mtu-net.ru

1. Удешевление и распространенность современных многопроцессорных вычислительных систем активизировали создание коммерческих кроссплатформенных программных продуктов для проведения высокопроизводительных вычислений во многих областях науки и техники. Применительно к механике это, например, ANSYS, LS-DYNA – для прочностных и связанных задач механики твердого тела; STAR-CD, FLUENT, CFX – для задач в области гидро- и газодинамики. Перечисленные программные продукты доступны широкому кругу инженеров и активно применяются в промышленности, однако их применение в области поисковых научных исследований ограничено дороговизной лицензий и закрытостью кода. В связи с этим остается актуальной разработка специализированных вычислительных программных комплексов с открытым кодом, предоставляющих исследователю гибкий инструмент для достоверного анализа механизмов тех или иных характерных особенностей движения и взаимодействия сплошных сред. Такой анализ необходим как предварительный этап при разработке и обосновании методик проведения массовых параметрических



**Рис. 1.** Комбинации ярусных (а) и погруженных одна в другую (б, в) сеточных структур позволяют эффективно рассчитывать отрывное течение в многосвязных областях (сетки 1 и 2), адекватно отображая основные структурные элементы обтекания тела, такие как пограничный слой (сетка 3) и нестационарный вихревой след (сетка 4)

расчетов в различных инженерных приложениях. Иллюстрацией может служить специализированный программный комплекс VP2/3 [1–2] и реализованные в нем многоблочные вычислительные технологии (МБТ), нацеленные на разрешение существенно разномасштабных структурных элементов с помощью совокупности интерактивно адаптированных к решению пересекающихся сеток.

Факторизованный многоблочный алгоритм кодов VP2/3 основывается на неявном конечно-объемном методе решения уравнения неразрывности, осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, замкнутых с помощью модели переноса сдвиговых напряжений (MSST), и энергии в рамках концепции декомпозиции расчетной области и генерации в выделенных существенно разномасштабных подобластях независимых косоугольных структурированных сеток H- и O-типа с частичным перекрытием (рис. 1). Система исходных уравнений записывается в криволинейных, согласованных с границами расчетной области координатах относительно приращений зависимых переменных. Используется центрированный расчетный шаблон с привязкой всех зависимых переменных к центру ячейки. В зонах перекрытия сеток параметры потока и характеристики турбулентности определяются с помощью неконсервативной линейной интерполяции (рис. 1, d) [1].

Далее приводятся примеры использования кодов VP2/3 к задачам исследования механизмов управления течениями с помощью вихревых ячеек и интенсификации теплообмена на поверхностях с искусственным рельефом.

2. Вихревые ячейки (vortex cells) стали дополнением и практическим воплощением известного в аэрогидромеханике понятия «уловленный вихрь» (trapped vortices). Интерес к их изучению возник в связи с известным проектом Л.Н. Щукина летательного аппарата интегральной компоновки ЭКИП (Экология

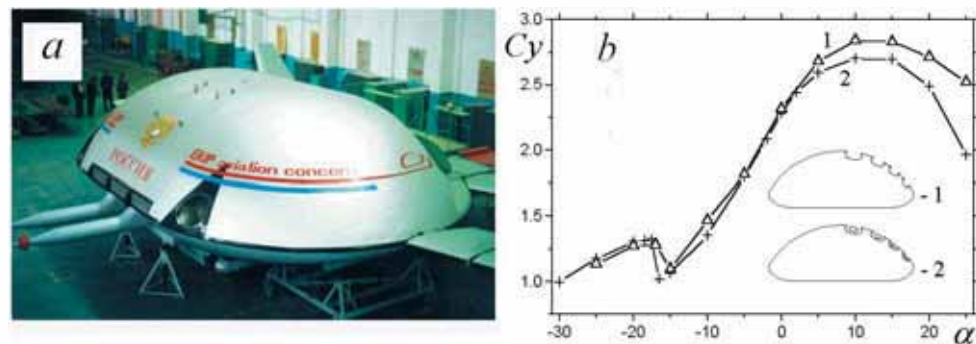


Рис. 2. Летательный аппарат интегральной компоновки ЭКИП

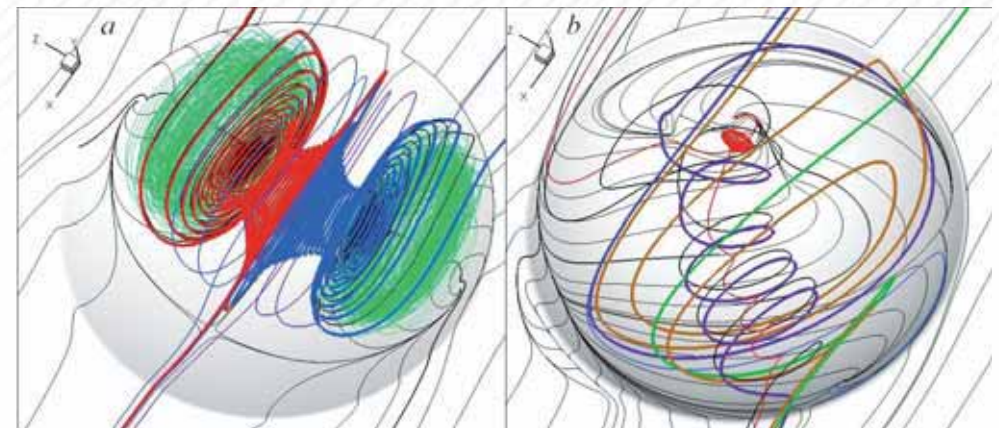
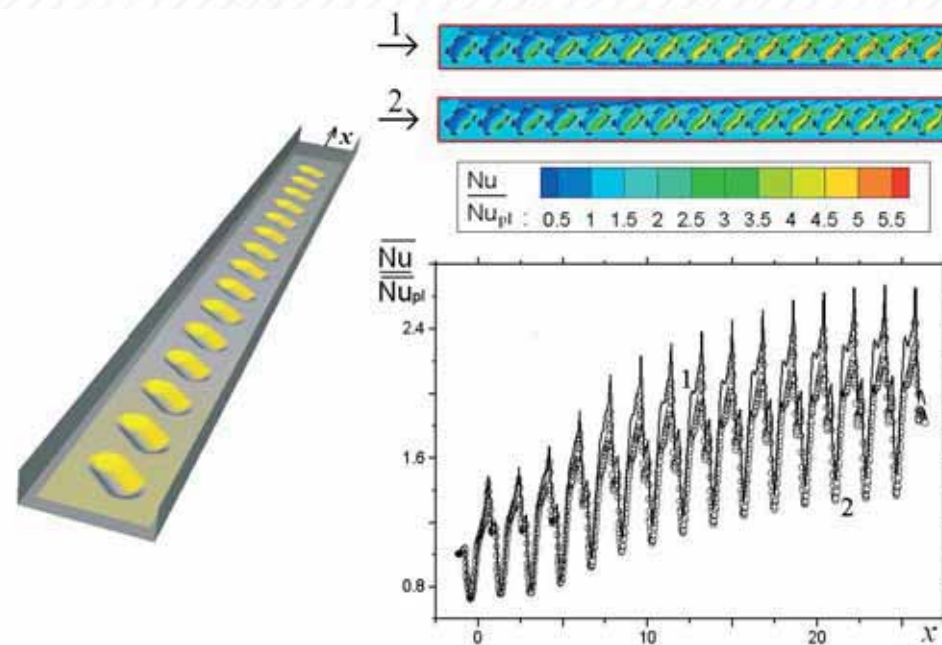


Рис. 3. Струйно-вихревые структуры в окрестности сферических лунок глубины 0,13 (а) и 0,26 (b) в долях диаметра «пятна» на стенке узкого канала шириной 2,5 и высотой 0,33 при числе Рейнольдса 40000

и Прогресс), в которой большая подъемная сила обеспечивается за счет применения толстого профиля с системой вихревых ячеек для предотвращения глобального отрыва рис. 2. Как показали проведенные в МГУ под руководством проф. Г.Ю. Степанова фундаментальные исследования [1], воздействие на мелкомасштабное течение в вихревой ячейке, например, — за счет слабого отсоса, может оказывать глобальное влияние на обтекание толстого профиля, обеспечивая его практически безотрывной характер. На рис. 2, b приводятся зависимости от угла атаки коэффициента подъемной силы  $C_y$  толстого профиля с вихревыми ячейками при сосредоточенном щелевом (1) и распределенном по центральному телу (2) типами отсоса с одинаковой интенсивностью  $C_q = 2\%$ .

3. Интенсификация теплообмена в каналах за счет формирования на их стенках периодических рельефов с лунками различной конфигурации привлекает внимание исследователей всего мира, поскольку в этой технологии возможен опережающий рост теплоотдачи по сравнению с ростом гидравлических потерь [2]. Существенный прогресс в расчетах вихревого теплообмена на рельефах из лунок достигнут благодаря соединению методов МБТ с MSST в пакете VP2/3. В частности, идентифицирован эффект бифуркации струйно-вихревого течения в сферической лунке и связанные с ним гистерезисные явления при переходе от симметричной к несимметричной структурам обтекания (рис. 3). Переход от симметричной двухячейковой к моноструктурной вихревой схеме обтекания сопровождается резкой интенсификацией теплообмена в окрестности лунки.



**Рис. 4.** Теплоотдача рельефа из овальных лунок на стенке узкого канала (относительная глубина лунки – 0,2 в долях  $L$  ширины пятна лунки, относительная площадь лунок стенке – 0,49); 1 – на входе в канал задан однородный поток с толщиной пограничного слоя 0,15  $L$ ; 2 – на входе задан профиль полностью развитого турбулентного течения в канале

По результатам массовых параметрических расчетов на многопроцессорных вычислителях составлена карта режимов ламинарного и турбулентного обтекания сферических уединенных лунок и цилиндрических траншей. Выявлены перспективные схемы скошенных упорядоченных рельефов из удлиненных овальных лунок, которые обеспечивают повышенную теплоотдачу. На рис. 4 представлены результаты расчетов теплообмена в узких каналах с однорядным пакетом овальных лунок при их расположении лесенкой (число Рейнольдса по ширине лунки  $Re = 20000$ ). Наблюдается мультипликативный эффект роста коэффициента теплоотдачи по продольной координате  $x$ , причем имеет место насыщение: начиная с 12-й лунки теплогидравлические характеристики стабилизируются. Суммарная теплоотдача оказывается вдвое выше, чем для гладкой стенки при примерно таком же приросте гидравлических потерь (таблица: сравнение относительных суммарных теплоотводов, гидравлических потерь и теплогидравлической эффективности в окрестности 14-й лунки при различных профилях скорости на входе).

Тип профиля скорости	$Nu/Nu_{pl}$	$\xi/\xi_{pl}$	$(Nu/Nu_{pl})/(\xi/\xi_{pl})$
Однородный с пограничным слоем	2,18	2,17	1,005
Полностью развитое течение	1,98	2,16	0,92

Большой объем параметрических расчетов был выполнен за относительно короткое время благодаря сочетанию мощности суперкомпьютерной техники и эффективности применения МВТ в распараллеленных кодах VP2/3. Например, результаты расчета теплообмена при турбулентном обтекании глубокой сферической лунки на плоскости с помощью пакета FLUENT на адаптивных неструктурированных сетках, сгущенных к сдвиговому слою и содержащих 1175 тысяч ячеек, с хорошей точностью были воспроизведены с помощью пакета VP2/3 на многоблочной сетке с количеством ячеек всего 370 тысяч.

Работы выполнены при поддержке РФФИ, проекты 09-08-01190, 11-01-00039 и 11-08-00062.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А.В. Ермишиной и С.А. Исаева. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2003. – 360 с.
2. 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.