

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРЕ «ЛОМОНОСОВ» С ПОМОЩЬЮ FLOWVISION

А.А. Аксенов, А.А. Дядькин, С.В. Жлуктов, В.А. Кутин, И.В. Москалёв, Г.Б. Сушко, С.А. Харченко, А.С. Шишаева

Введение. В настоящее время многие отрасли промышленности используют моделирование задач вычислительной аэро- и гидродинамики как неотъемлемую часть процесса проектирования. К таким отраслям принадлежит традиционно авиастроение, космическая промышленность, автомобилестроение. В последнее время моделирование требуется уже и более «приземленным» отраслям, производящим товары народного потребления — от санитарно-технических устройств до проектирования мобильных телефонов. Параллельная версия программного комплекса **FlowVision-НРС** [1-5], разрабатываемого компанией ТЕСИС, используется для моделирования широкого круга индустриальных задач, включая задачи с подвижными телами и свободными поверхностями для областей с трехмерной геометрией, обладающей произвольной топологией и сложной с точки зрения количества разномасштабных деталей.

Программный комплекс **FlowVision-НРС** имеет уникальные возможности моделирования сопряженных задач механики – взаимодействия жидкости (газа) с деформируемыми конструкциями совместно с известной системой конечно-элементного анализа Abaqus [6]. Программный комплекс **FlowVision-НРС** основан на конечно-объемном методе аппроксимации уравнений движения жидкости и на полностью неявной схеме расчета. Он использует полностью автоматический построитель динамической локально-адаптивной расчетной сетки. Для адекватного воспроизведения тонких физических эффектов в трехмерных областях, насыщенных большим количеством деталей, требуются подробные расчетные сетки, содержащие от сотен тысяч до сотен миллионов расчетных ячеек. Моделирование подобных задач требует огромных вычислительных ресурсов и может быть проведено только на самой современной мощной параллельной вычислительной технике.

Недавно в НИВЦ МГУ заработал мощный суперкомпьютер «Ломоносов». Команде разработчиков программного комплекса “**FlowVision-НРС**” в рамках выполнения совместного проекта с НИВЦ МГУ был любезно предоставлен доступ на этот компьютер. В данной работе описываются некоторые большие задачи, решенные на этом суперкомпьютере с использованием программного комплекса “**FlowVision**”.

Работы выполнялись в рамках работ по государственному контракту 02.514.11.4125 с Министерством образования и науки РФ.

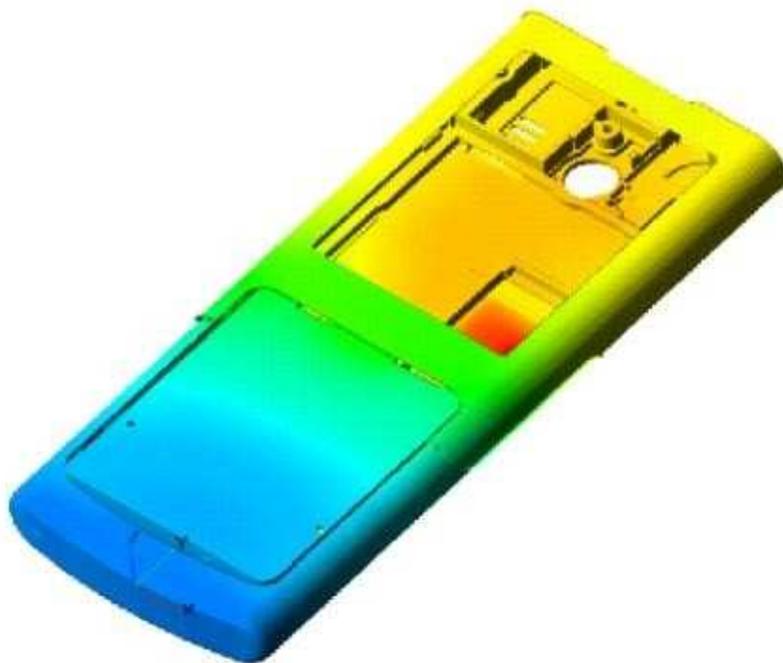


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности телефона

Тестовые задачи. Для проведения численных экспериментов были выбраны следующие тестовые задачи:

Задача о теплообмене в сотовом телефоне. Рассматривается задача о конвективном теплообмене и теплопередаче в сложной сборке сотового телефона с несколькими источниками тепла (Рисунок 1). Особенностью этой задачи является очень сложная геометрия, максимально приближенная к сборке реального устройства: число деталей в сборке порядка 300. Из-за большого числа очень тонких поверхностей (~0.05 мм)

большой площади возникает необходимость использовать очень неравномерную сетку с высоким уровнем адаптации. Расчетная сетка содержит порядка 20 млн. расчетных ячеек. На Рисунке 1 показано распределение температуры на некоторых деталях телефона (остальные детали «спрятаны», чтобы не загромождать вид).

Основной результат этой работы - принципиальная возможность моделирования сложных устройств на суперкомпьютере без использования упрощений задачи, как это делается обычно при проектировании сотовых телефонов. Таким образом, можно сказать, что впервые в мире на компьютере «Ломоносов» был проведен расчет современного мобильного телефона, заданного в виде сборочной геометрической модели.

Задача об обтекании крыла самолета. Рассчитывается обтекание крыла в аэродинамической трубе с учетом крепежа (Рисунок 2). Цель расчета - сравнение с экспериментальными данными. Рассматриваются два скоростных режима и три угла атаки. Расчетная сетка содержит 6 миллионов ячеек. На Рисунках 3 и 4 показаны распределения давления для угла атаки 4 градуса и двух скоростных режимов: дозвукового ($M = 0.15$) и трансзвукового ($M = 0.78$).

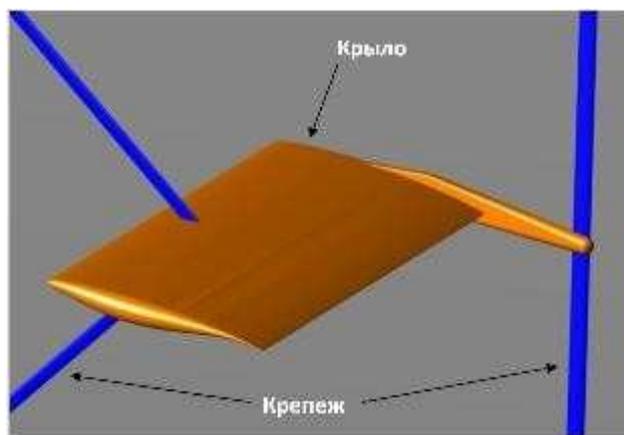


Рис.2 : Геометрия задачи о крыле

Моделирование задачи показало удовлетворительное совпадение с с экспериментальными данными, отличие полученных коэффициентов сопротивления (C_x) и подъёмной силы (C_y) от экспериментальных значений - порядка 10%. Наиболее важным является то, что рассчитанные зависимости C_x , C_y от угла атаки качественно согласуются с экспериментальными зависимостями (см. Рисунки 5 и 6), поскольку именно характер этих кривых определяет устойчивость и управляемость самолета.

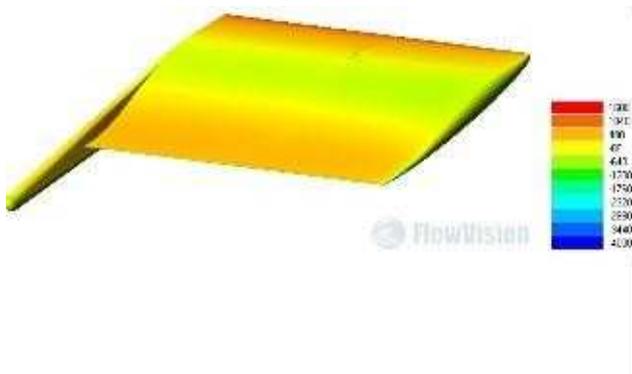


Рис. 3: Распределение давления по поверхности крыла ($M = 0.15$, угол атаки 4 градуса)

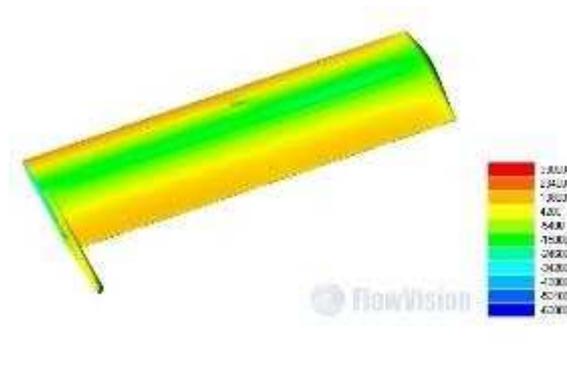


Рис. 4: Распределение давления по поверхности крыла ($M = 0.78$, угол атаки 4 градуса)

Подробная сетка и возможность расчётов на суперкомпьютере позволили достаточно точно определить положение ударной волны при сверхзвуковом режиме обтекания для трёх углов атаки (см. Рисунок 4).

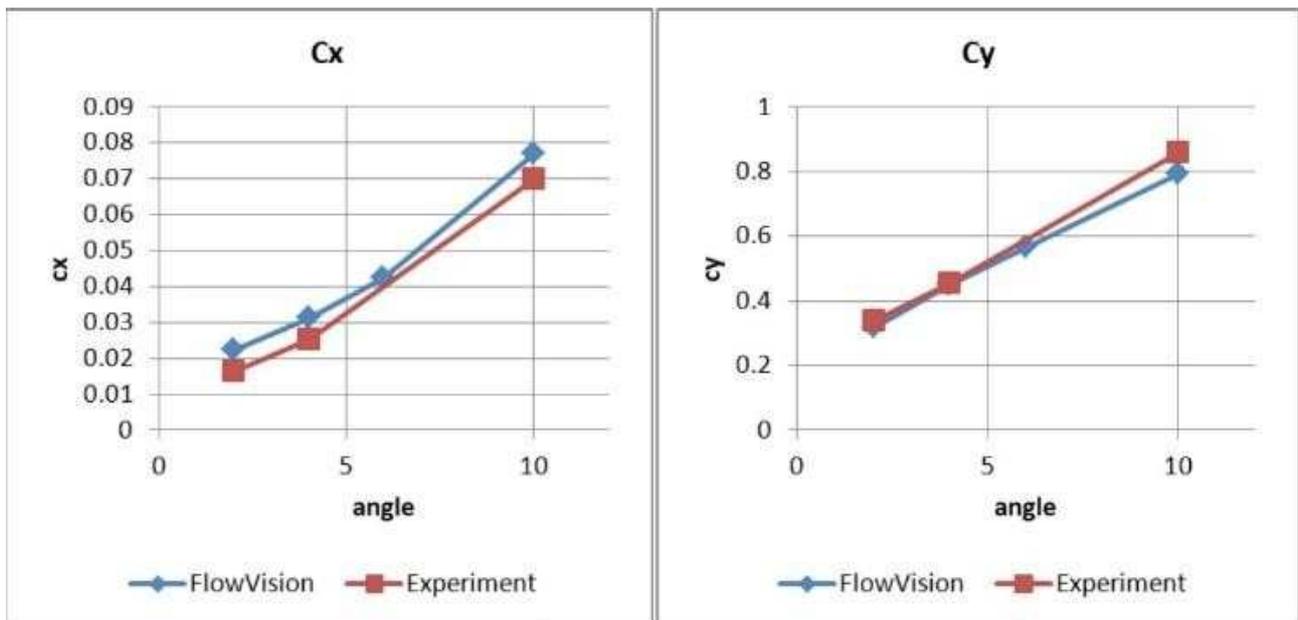


Рис. 5. Зависимость коэффициентов C_x и C_y от угла атаки при $M = 0,15$

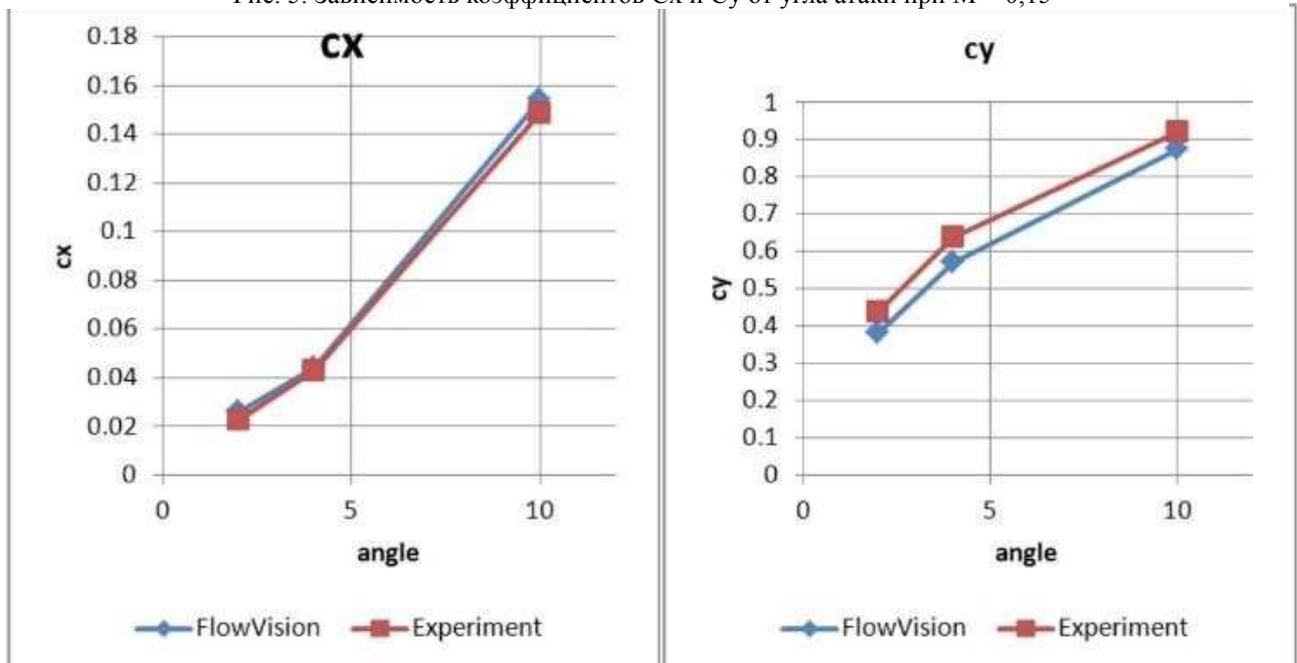


Рис.6. Зависимость коэффициентов C_x и C_y от угла атаки при $M = 0,78$

Задача об обтекании судна с вращающимся винтом. Данная задача характеризуется высокой ресурсоемкостью. Совместно с решением уравнений Навье-Стокса, уравнения для турбулентной энергии и уравнения для скорости её диссипации, рассчитывается движение свободной поверхности. При этом на каждом шаге расчетная сетка перестраивается в области наибольшего её измельчения – около вращающегося винта судна. Скорость движения судна = 6,125 м/с, скорость вращения винта = 20,1 рад/с. Задача решается в симметричной постановке (на рисунках геометрия зеркально отражена). Расчетная сетка состоит ~ 7 млн. расчетных ячеек. На Рисунках 7-8 представлены результаты моделирования.

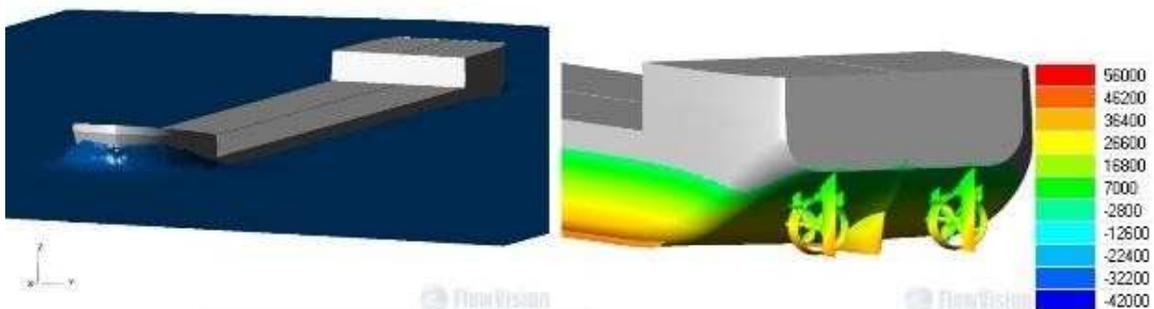


Рис. 7. Свободная поверхность около судна и распределение по его поверхности

Задача о газодинамическом диоде. Принцип действия газодинамического диода основан на снижении расхода газа при течении в одном направлении (диод в состоянии «закрыт») и минимизации сопротивления потоку при течении в другом направлении (диод в состоянии «открыт»). Рассматривается конструкция изогнутой трубки (радиус оси трубки – 105 мм; диаметр трубки 14 мм, Рисунок 9). В трубке проделаны прорезы через равное расстояние ~7мм под углами к оси трубки в поперечном и продольном сечении 35 и 55 градусов. В прорезы впаяны «лопатки» - листы металла толщиной ~1 мм, высотой 7 мм. Если газ поступает в «открытом» направлении, он скользит над лунками, образованными лопатками. Если газ поступает в обратном направлении, то формируется спиральное течение, которое сильно тормозит поток. Течение в таком устройстве как правило получается сложным и требует всестороннего изучения. Аналогичный принцип действия лежит в основе

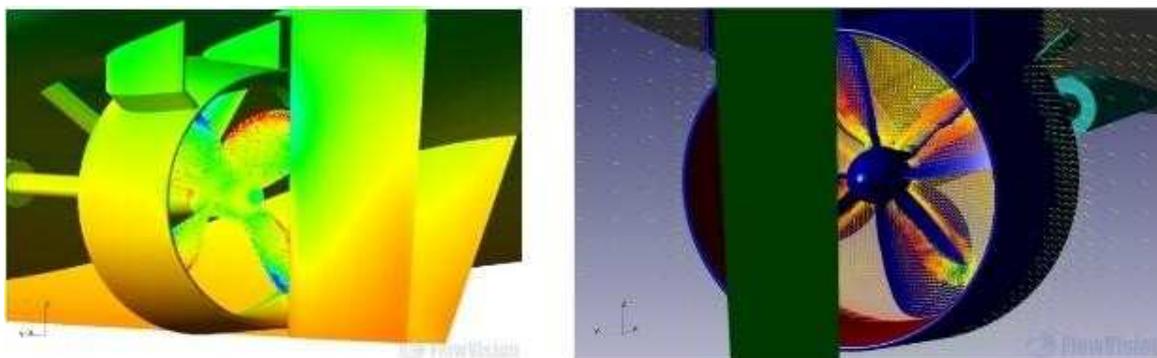


Рис. 8. Распределение давления по поверхности винта и распределение скорости в плоскости винта

перспективной отечественной разработки роторно-вихревого компрессора/турбины.

Качество газодинамического диода характеризуется диодностью – отношением расхода при течении в «закрытом» диоде к расходу при течении в «открытом» диоде. Чем ближе величина к нулю, тем лучше. Качество рассматриваемого диода зависит от большого числа параметров, влияние которых не является независимым. Вот некоторые из них:

- высота лопаток;
- угол наклона в продольном сечении;
- угол наклона в поперечном сечении;
- величины радиусов скруглений у основания лопаток и на их кромке;
- расстояние между лопатками;
- радиус изгиба трубы;
- сектор установки лопаток в поперечном сечении трубы.



Рис. 9. Геометрия задачи о газодинамическом диоде

Оценим вычислительную сложность задачи. Размер расчетной области составляет 22см x 25см x 1.4 см. Расстояние между лопатками равняется 7мм. Для правильного моделирования течения надо хорошо разрешить возвратно-циркуляционные зоны между лопатками, поперек зазора должны находиться порядка 30-40 расчетных ячеек. Следовательно, размер ячеек между лопатками должен быть порядка 0.2 мм. По предварительным оценкам выбрана начальная расчетная сетка 500x500x60. В этом случае, размер расчетных ячеек по каждому направлению составляет около 0.5 мм. Дальнейшее уточнение расчетной сетки проводится за счет адаптации ячеек между лопатками. В результирующей расчетной сетке число расчетных ячеек составило ~103 млн. Моделирование этой задачи проводилось в режиме (128 MPI процессов X 8 потоков вычислений) = 1024 ядра, на каждом узле было запущено по 2 MPI процесса, всего задействовано 64 узла, по 16 потоков вычислений на узел. На Рисунке 10 показано распределение

векторов скорости для обоих случаев, на Рисунке 11 показаны траектории движения частиц жидкости в диоде. На Рисунке 11 хорошо видно спиралеобразное движение частиц жидкости в случае положения диода «закрыто», и практически прямоочное движение жидкости в случае положения «открыто».

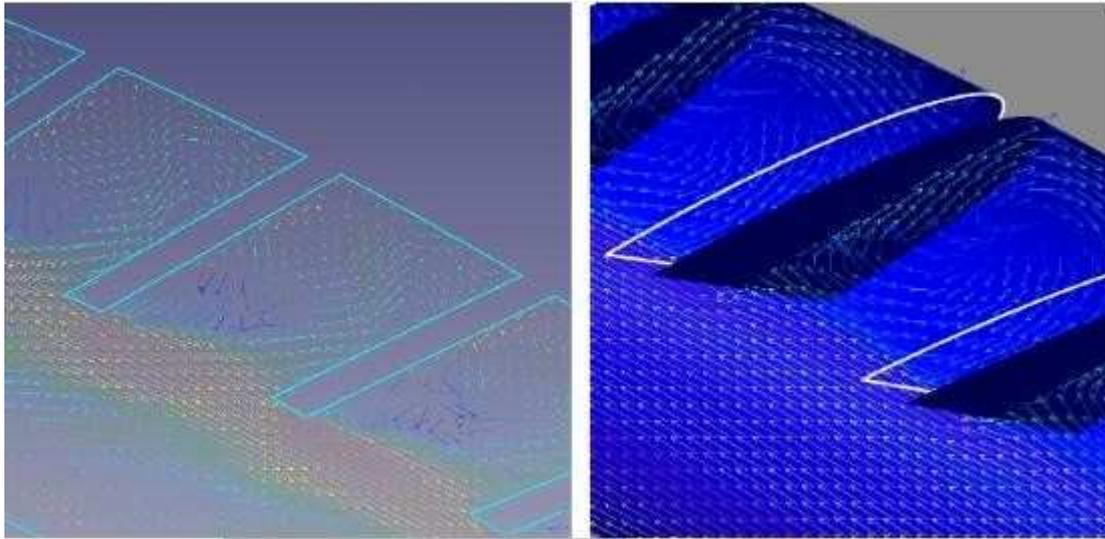


Рис. 10. Вектора скорости в сечении в закрытом и открытом положении

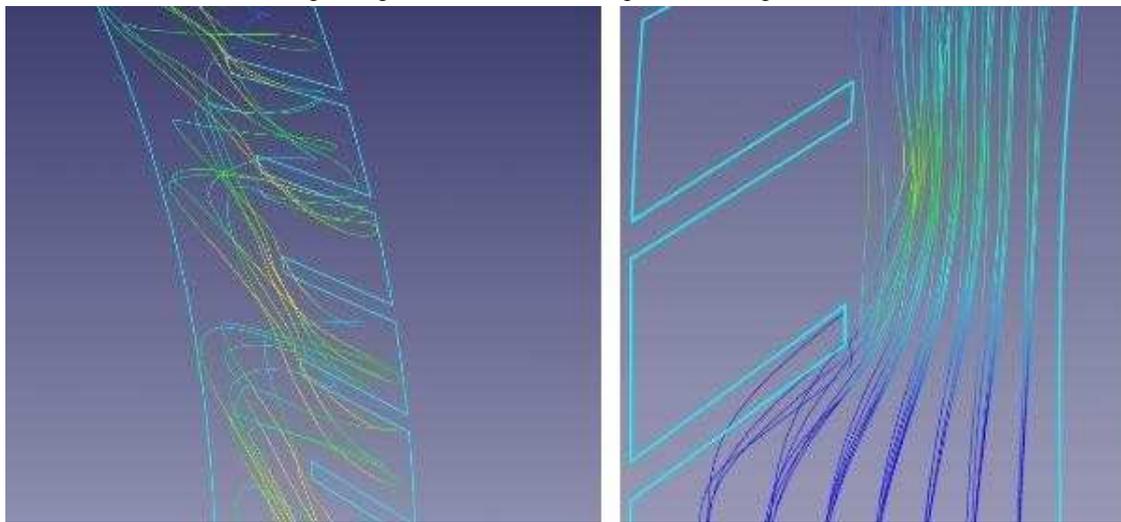


Рис. 11. Траектории движения частиц жидкости в закрытом и открытом положениях

Выводы. В статье представлены результаты использования пакета “**FlowVision**” для моделирования промышленных задач аэро- и гидродинамики, полученные на суперкомпьютере «Ломоносов». Проведенные расчеты показывают хорошую масштабируемость оборудования и огромную суммарную вычислительную мощность суперкомпьютера «Ломоносов». Наличие в России суперкомпьютера такого класса позволяет моделировать на нем прикладные инженерные задачи такой сложности, которые невозможно было моделировать на предыдущих поколениях суперкомпьютеров.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Aksenov A., Dyadkin A., Pokhilko V., “Overcoming of Barrier between CAD and CFD by Modified Finite Volume Method”, Proc 1998 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, ASME PVP-Vol 377-1, 1998.
2. Aksenov A.A., Kharchenko S.A., Konshin V.N., Pokhilko V.I., “FlowVision software: numerical simulation of industrial CFD applications on parallel computer systems”, Parallel CFD 2003 conference, Book of abstracts, p. 280-284, 2003.
3. Дядькин А.А., Харченко С.А., “Алгоритмы декомпозиции области и нумерации ячеек с учетом локальных адаптаций расчетной сетки при параллельном решении систем уравнений в пакете FlowVision” // Труды Всероссийской научной конференции “Научный сервис в сети Internet: многоядерный компьютерный мир”, 201-206, 2007.
4. Харченко С.А., “Влияние распараллеливания вычислений с поверхностными межпроцессорными границами на масштабируемость параллельного итерационного алгоритма решения систем линейных уравнений на примере уравнений вычислительной гидродинамики “ // Труды международной научной конференции Параллельные вычислительные технологии (ПавТ’2008), Санкт-Петербург, 28 января – 1 февраля 2008 г. Челябинск, Изд. ЮУрГУ, 2008, с.494-499.

5. Сушко Г.Б., Харченко С.А., “ Экспериментальное исследование на СКИФ МГУ "Чебышев" комбинированной MPI+threads реализации алгоритма решения систем линейных уравнений, возникающих во FlowVision при моделировании задач вычислительной гидродинамики” // Труды международной научной конференции Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009), Нижний Новгород, 30 марта – 3 апреля 2009 г. Челябинск, Изд. ЮУрГУ, 2009, с.316-324.
6. Abaqus User Manual, version 6.8, Providence, 2008.