

# Использование терафлопных суперкомпьютеров для решения промышленных задач вычислительной гидродинамики

И.В. Москалёв, М.Л. Смирнова

В статье описывается решение задачи о турбулентном обтекании мяча для гольфа в программном комплексе FlowVision-НПС на суперкомпьютере СКИФ МГУ. В данной работе исследуется сходимость по сетке, влияние на решение размеров расчетной области, применимость вариантов моделирования определяющего подъемную силу вращения мяча. Даны результаты расчета для различных линейных скоростей и частот вращения мяча, показана принципиальная возможность решения задачи об обтекании мяча для гольфа.

## 1. Введение

Различные задачи CFD необходимо решать практически в любой отрасли промышленности. Индустрия спорта отнюдь не исключение, многие задачи являются ресурсоемкими и требуют больших вычислительных мощностей. В статье рассказывается о применении суперкомпьютера для решения задачи о мяче для гольфа. Одной из сложнейших задач оказался поиск оптимальной расчетной сетки, позволяющей отследить тонкие физические явления при минимальной размерности задачи. При использовании FlowVision-НПС и СКИФ-МГУ получен важный опыт работы на суперкомпьютере в условиях конкуренции за аппаратные ресурсы, были выявлены достоинства и исправлены недостатки, а так же выработаны рекомендации по использованию программного комплекса FlowVision-НПС при решении задач большой размерности. В данный момент продолжаются исследования, призванные отработать оптимальную методику решения сложного, но перспективного класса задач с поверхностями, обеспечивающими снижение сопротивления воздуха, такими, как поверхность мяча для гольфа. Предварительные исследования показали, что необходимо провести масштабную работу по поиску методики решения задач данного класса: найти оптимальную сетку и оптимальный, с точки зрения распараллеливания вычислений, метод ее построения; определить границы применимости различных моделей турбулентности и способы моделирования вращения мяча... Лишь после того, как будет установлена оптимальная методика расчета подобных задач, возможно будет эффективно провести исследования влияния частоты вращения на сопротивление и подъемную силу, влияние глубины лунок на сопротивление.

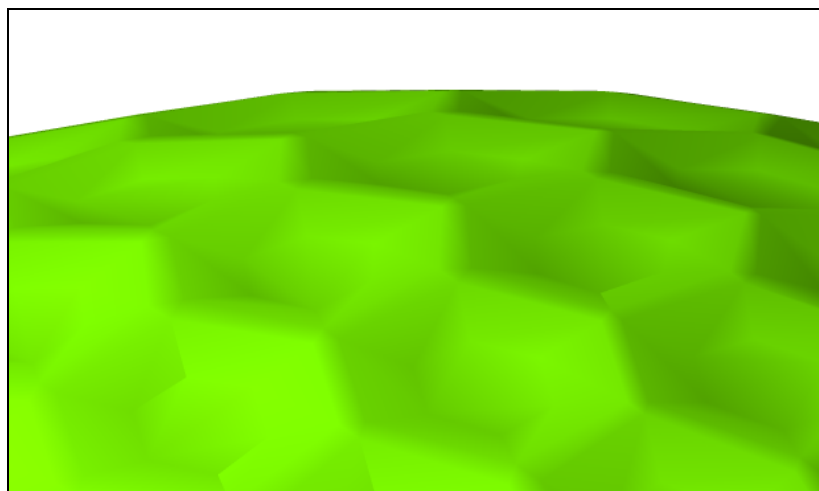


Рис. 1. Углубления на мяче для гольфа.

## 2. Описание проблемы

Поверхность мяча для гольфа состоит из множества углублений (dimple) (см. рис. 1), которые призваны обеспечить снижение сопротивления воздуха. Более поздний отрыв способствует падению коэффициента сопротивления  $C_d$  относительно гладкой сферы. Кроме того, имеет место эффект Магнуса, заключающийся в возникновении подъемной силы, действующей на вращающееся тело. Моделирование указанных явлений требует больших вычислительных ресурсов и не представляется возможным без использования производительных и распределенных систем.

Глубина лунок в использованной в эксперименте геометрии составляет около 0,05 мм при диаметре мяча 40 мм! Необходима очень подробная расчетная сетка на большой площади. В ходе экспериментов по определению влияния размеров расчетной области на решение проводились численные эксперименты с одномерной задачей с сеткой в 400 000 расчетных ячеек!

## 3. Предварительный расчет

Предварительный расчет производился в симметричной постановке, расчетная область была выбрана кубическая, с длиной грани в 20 диаметров мяча (см. рис. 2). Мяч диаметром 4 см вращался вокруг оси, перпендикулярной площади симметрии. Очевидно, что симметричная постановка в данной задаче не корректна. Но для предварительного расчета с целью экономии вычислительных ресурсов была выбрана эта схема. Кроме того, дополнительного исследования требует предположение о том, что вращения мяча закручивает поток и стабилизирует его в направлении перпендикулярном плоскости симметрии. Исследование в этом направлении, возможно, позволит вдвое снизить размерность задачи.

Скорость потока воздуха при нормальных атмосферных условиях: 60 м/с. Проводились численные эксперименты для частот вращения: 300, 367, 600, 750  $\text{м}^{-1}$ . Расчет проводился с использованием стандартной k- $\epsilon$  модели турбулентности.

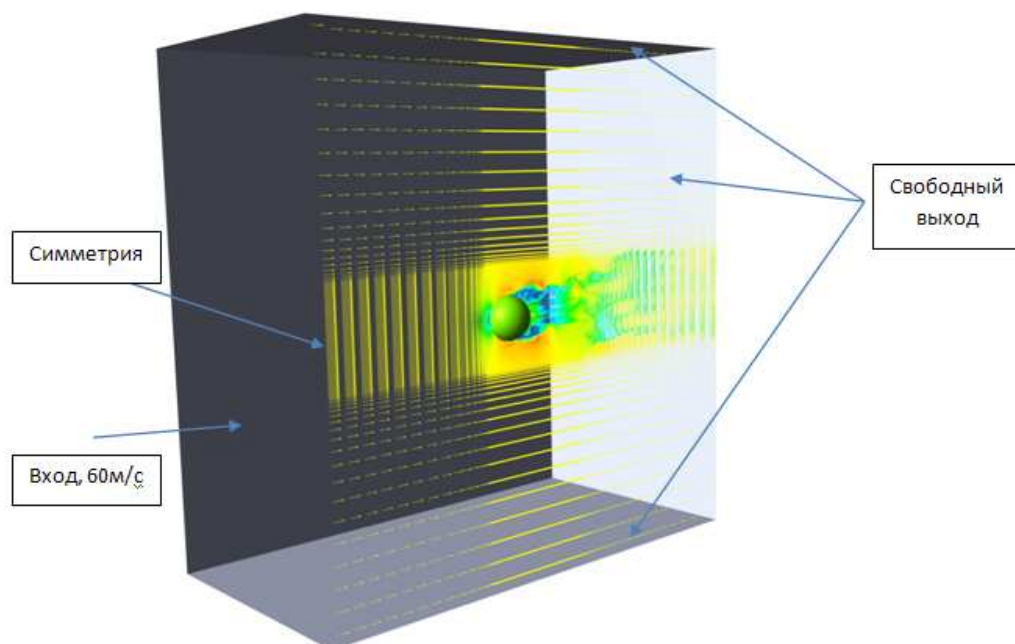


Рис. 2. Расчетная область, граничные условия и распределение векторов скорости в трехмерной задаче с симметричной постановкой.

Сравнение с экспериментом [1] показало (см. рис. 3), что качественно расчет правильно передает характер изменения коэффициентов  $C_d$  и  $C_f$  в зависимости от числа  $RSR = \omega * r / V$  (где

$\omega$ -частота вращения,  $r$ -радиус мяча,  $V$ -скорость воздушного потока), но количественные значения отличаются почти в полтора раза. Неудовлетворительное значение подъемной силы и силы сопротивления связано с отсутствием учета обратного градиента давления, недостаточным разрешением углублений и аэродинамического следа мяча. Кроме того, экспериментальные данные, которыми мы располагали, относятся к неизвестной геометрии мяча. Такой параметр, как глубина лунок, должен оказывать заметное влияние на величину коэффициента сопротивления.

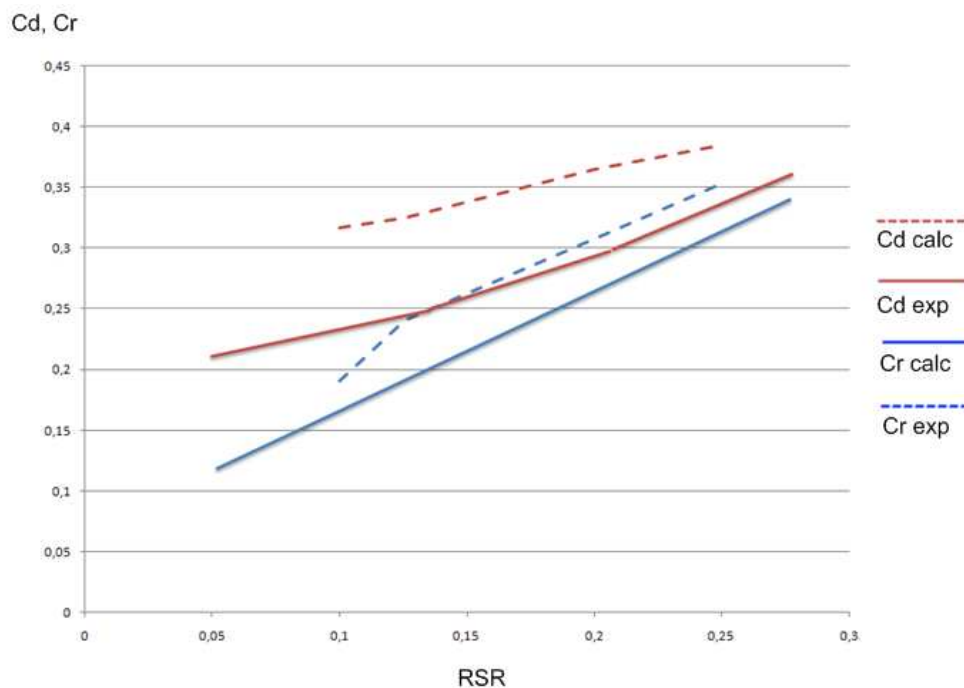


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные значения коэффициентов Cd и Cr в зависимости от числа RSR.

### 3. Постановка задачи

Для решения задачи обтекания мяча для гольфа целесообразно использовать не отражающие граничные условия («Римановские»), позволяющие использовать небольшие размеры расчетной области.

Однако в ходе уже первых экспериментов стало очевидно, что число ячеек в оптимальной начальной сетке не значительно по сравнению с расчетной сеткой, получающейся в результате адаптации по поверхности мяча. Было принято решение использовать большую расчетную область и стандартные граничные условия «Вход» и «Свободный выход», чтобы гарантированно исключить любые влияния граничных условий на решение, кроме того, в реализованной во FlowVision модели «римановских» граничных условий имеются ограничения шага по времени: необходимо проводить расчеты с числом куранта порядка 5. Расчет мяча для гольфа при таком малом шаге по времени не целесообразен.

Таким образом, в дальнейших исследованиях использовалась расчетная область с размерами 0,8x0,8x0,8 м для полной постановки и 0,8x0,8x0,4 для симметричной (см. рис. 4а).

Для корректного моделирования потока воздуха у поверхности мяча необходимо применить низкорейнольдсовую модель турбулентности, а при характерных числах  $Re$  порядка  $10^4 - 10^5$  для корректной работы модели необходимо обеспечить значения  $Y^+$  (безразмерная величина, характеризующая минимальное расстояние от стенки до центра ячейки) ниже 8, а в идеале, порядка 1-3, что приводит к значительному росту числа ячеек. Частично проблема решается механизмом Локальной Адаптации (см. рис. 5), применяемым в программном комплек-

се FlowVision-НРС, однако число ячеек все равно велико и в процессе расчетов использовалось до 128 процессоров, ожидается использование 256 процессоров.

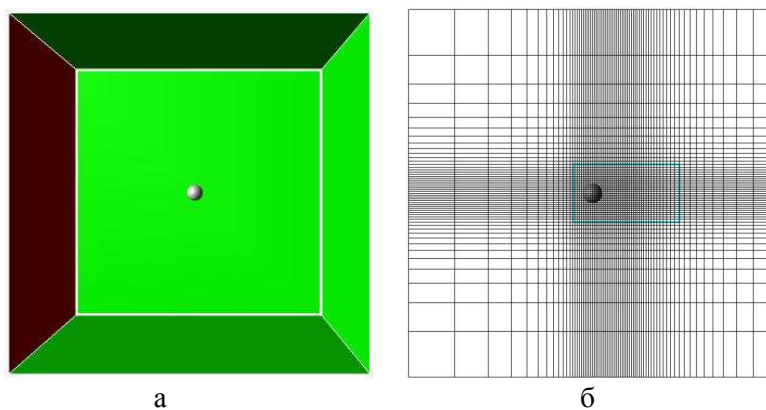


Рис. 4. а – расчетная область; б - начальная сетка, обозначен параллелепипед для адаптации.

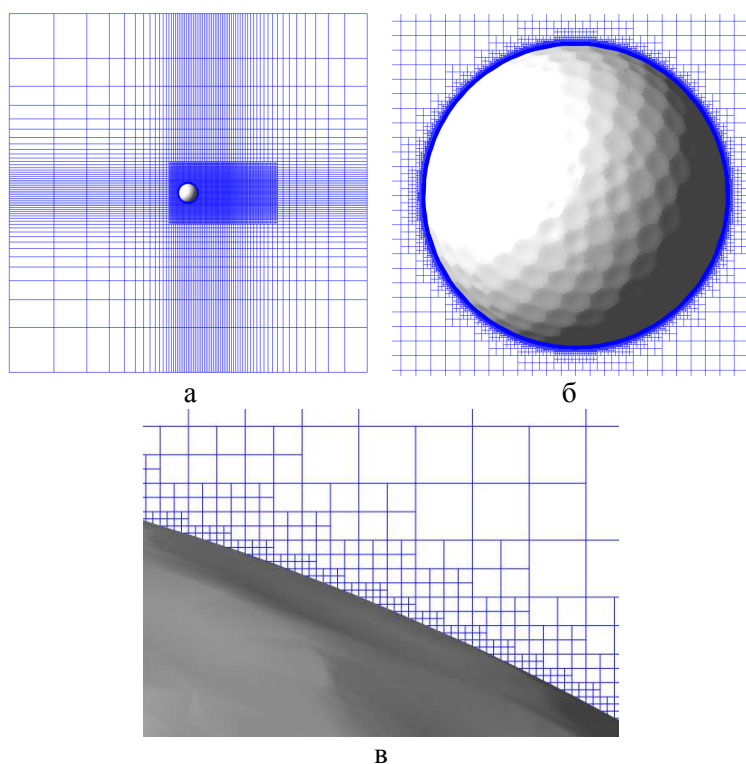


Рис. 5. Локальная адаптация 6-ого уровня по поверхности мяча и первого уровня в объеме параллелепипеда. а - адаптация в параллелепипеде; б, в – адаптация по поверхности мяча

Во FlowVision-НРС реализована модель подвижных тел. В расчетную область импортируется геометрия – подвижное тело, которая движется по заданному закону. Во время расчета на каждой итерации происходит изменение положения подвижного тела и перестроение расчетной сетки. В задачах большой размерности перестроение сетки может происходить то же время, что расчет газодинамических уравнений, поэтому ряд исследований, в том числе и сходимости по расчетной сетке, проводился для неподвижного мяча. В данный момент разработчики FlowVision завершают работу по оптимизации алгоритма построения сетки в задачах с подвижными телами, ожидается значительный прирост производительности.

Другие параметры расчета: скорость набегающего потока:  $\sim 40$  м/с ( $Re=110\ 000$ ); вещество: воздух при температуре  $20^\circ\text{C}$  и давлении 1 атм.

## 4. Поиск оптимальных методов построения сетки в задаче об обтекании мяча для гольфа.

Проводился ряд расчетов в полной постановке для оценки предварительных результатов, поиска оптимальной начальной расчетной сетки, оценки возможности увеличения размерности задачи при имеющихся ресурсах.

Характер расчетной сетки определяется рядом требований, сформулированных в ходе предварительных расчетов:

- Необходимо обеспечить  $Y+$  менее 8;
- Необходимо разрешить самым верхним уровнем адаптации всю глубину лунки и то же расстояние над лункой (см. рис. 5а);
- Необходимо обеспечить в окрестности мяча (минимум на радиус по бокам и спереди; более чем на диаметр сзади) равномерную сетку, а так же достаточно подробно разрешить «хвост» за мячом, обеспечив медленный рост размера ячеек (см. рис. 5 а,б).

Существуют так же ограничения, связанные с продолжительностью расчета, особенностями работы FlowVision-НРС в параллельном режиме, особенностями архитектуры СКИФ-МГУ:

- Чем выше уровень адаптации, чем больше ячеек в малом по сравнению с расчетной областью объеме, тем больше ущерба масштабируемости задачи. При уровне адаптации б и с двумя слоями более 90 процентов ячеек сосредоточены в окрестности мяча (см. рис.7.)
- Сравнительно малые для больших задач объемы оперативной памяти, доступной одному процессору вынуждали запускать расчеты на большом числе процессоров, в результате, значительную часть времени приходилось стоять в очереди задач.

В первом варианте задачи была построена начальная сетка с минимальным размером квадратной ячейки (в окрестности мяча) 4мм. Такая сетка содержала всего 70 000 ячеек. Однако, был достигнут шестой уровень адаптации при недостаточном  $Y+$ , дальнейшее измельчение сетки увеличением уровня адаптации не целесообразно. При этом, на пятом уровне адаптации было 4 млн ячеек, а на шестом – 12 млн (количество слоев разное). Очевидно, что увеличение начальной сетки даже в три раза не скажется ощутимо на размерности задачи, поэтому была подготовлена начальная сетка с минимальным размером квадратной ячейки 1 мм. Во втором варианте начальной сетки был получен аналогичный результат, но уже не на шестом уровне адаптации, а на четвертом. При этом выигрыш в скорости расчета составил около 20 секунд на итерацию при одинаковой размерности (13 млн расчетных ячеек)! Для варианта с адаптацией шестого уровня среднее время итерации 147 секунд, для варианта с адаптацией четвертого уровня: 124 секунды.

При оценке значений коэффициента сопротивления было замечено, что уровень адаптации в боксе, разрешающем «хвост» мяча является избыточным (см. рис.9). Разница между коэффициентами  $C_d$  для задачи с адаптацией в боксе второго уровня и с адаптацией первого уровня составляет 1 процент (см. рис. 8). Учитывая то, что при изменении размера минимальной начальной ячейки от 4мм к 1мм, была измельчена начальная сетка позади мяча, целесообразно было отказаться от адаптации в боксе.

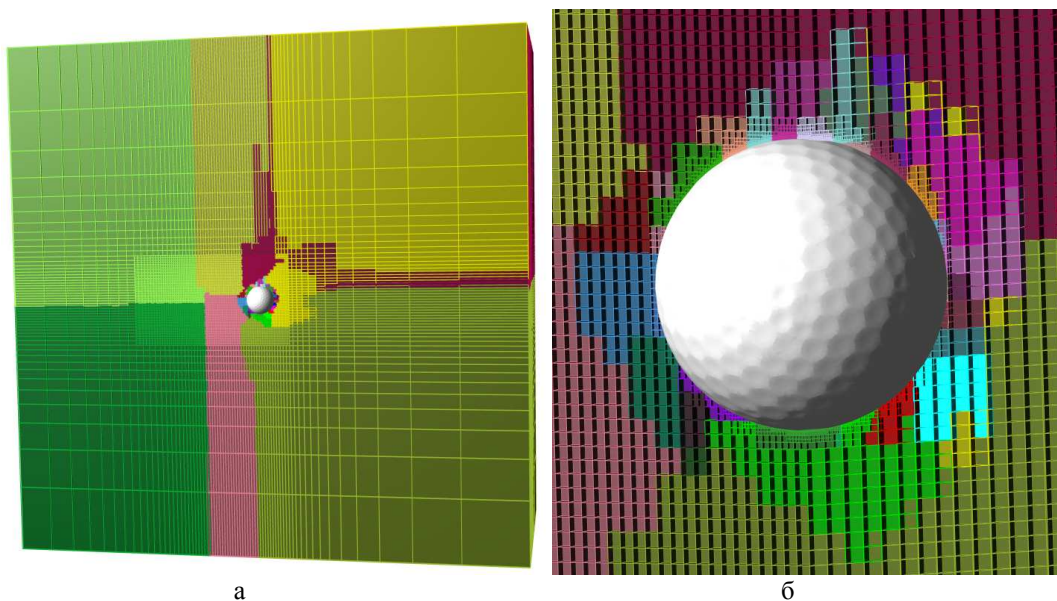


Рис. 7. Декомпозиция расчетной сетки для 128 процессоров.

<b>Уровень адаптации сетки на стенке мяча</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>6</b>
<b>Количество слоев заданного уровня адаптации на стенке мяча</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>Уровень адаптации в объеме параллелепипеда</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Количество расчетных ячеек</b>	<b>1 млн.</b>	<b>4 млн.</b>	<b>12.2 млн.</b>	<b>14.5 млн.</b>
<b>Результат расчета <math>C_d</math></b>	<b>0.46</b>	<b>0.417</b>	<b>0.336</b>	<b>0.34</b>

Рис. 8. Параметры и результаты задачи в полной постановке с размером минимальной начальной ячейки 4x4 мм.

В данный момент производится попытка расчета задачи со вторым вариантом начальной сетки с уровнем адаптации 5, необходимым для получения значения  $Y^+$  на уровне 4-6. Размерность задачи оказалась столь велика, что даже ее запуск на 128 ядрах, когда каждым двум ядрам была предоставлена вся оперативная память узла, приводил к ошибке аллокации памяти. При этом на сервере редко бывает полностью свободно 128 узлов.

Поэтому сейчас исследование сходимости по сетке продолжается для симметричной постановки. Неожиданным оказалось незначительное отличие в величине коэффициента  $C_d$  для симметричной и полной постановок задачи при одинаковой структуре расчетных сеток (см. рис. 9).

## 5. Промежуточные результаты.

Для оценки сходимости и выбора дальнейшего направления движения необходимо собирать и обрабатывать большие массивы данных. Расчетная сетка для варианта задачи в симметричной постановке и пятым уровнем адаптации в один слой занимает более 4 гигабайт на жестком диске! Это и нагрузка на сетевую инфраструктуру кластера (при большом числе активно работающих пользователей) и серьезные трудности при удаленной работе. В связи с этим особо

важным выглядит появление во FlowVision-НРС инструментов off-line визуализации. Это сохраняемые на серверной стороне файлы компактных размеров (десятки мегабайт) содержащие в себе информацию, необходимую и достаточную для визуализации интересующих параметров.

Ниже приведены некоторые промежуточные результаты, полученные в исследования сходимости по сетке.

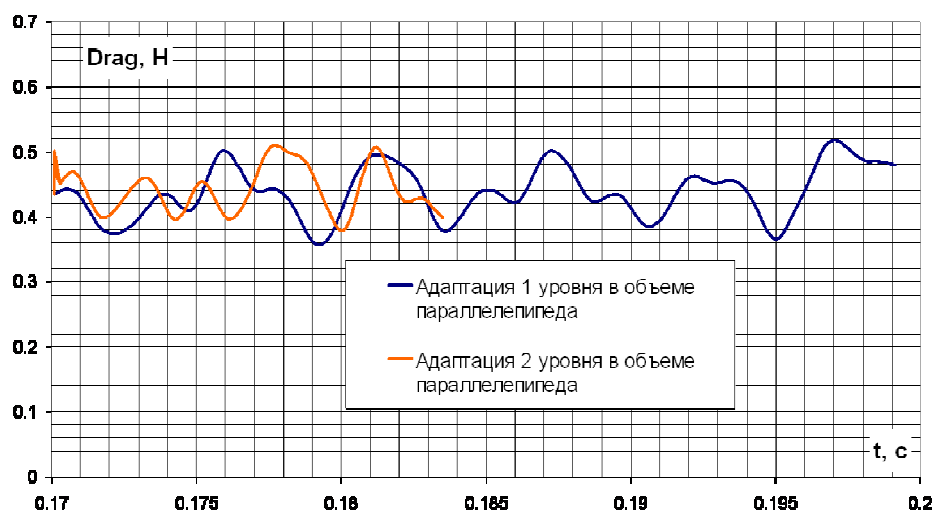


Рис. 9. График зависимости силы сопротивления от времени для двух уровней адаптации в боксе в окрестности и в «хвосте» мяча.

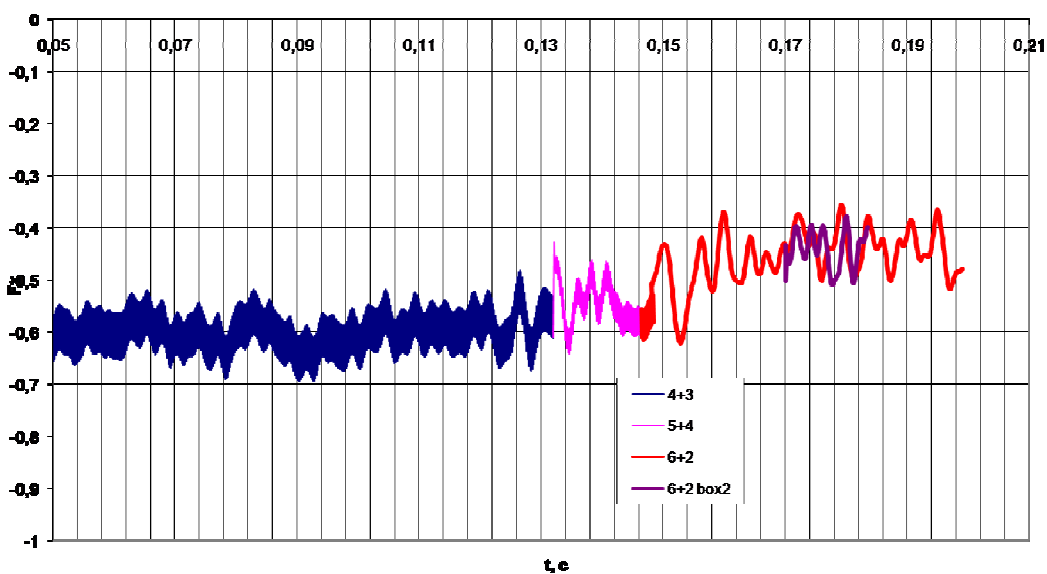


Рис.10. Зависимость силы сопротивления от подробности расчетной сетки: адаптация 1 уровня в объеме параллелепипеда и адаптация по поверхности в 4уровня 3 слоя, в 5 уровней 4 слоя, в 6 уровней 2 слоя; адаптация второго уровня в объеме параллелепипеда и адаптация в 6 уровней 2 слоя.

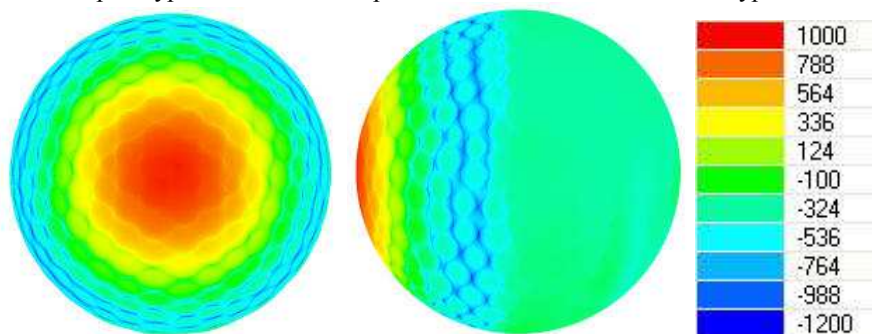
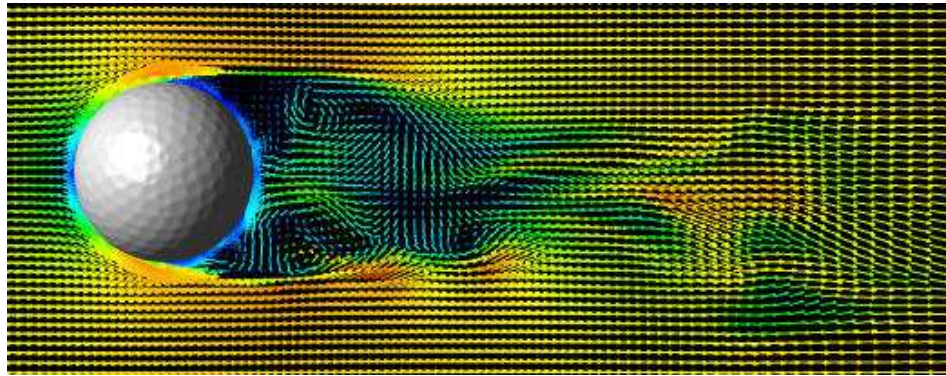
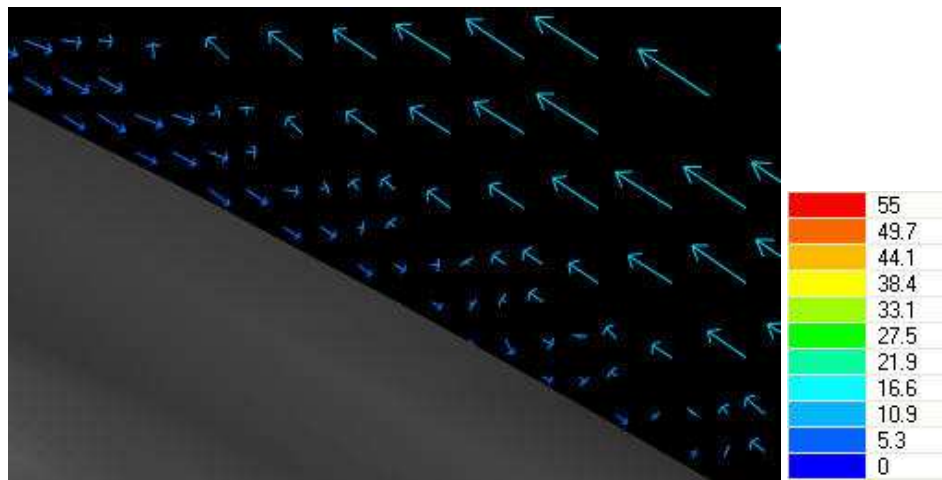


Рис. 11. Распределение давления по поверхности мяча для гольфа.



а



б

Рис.12. Распределение векторов скоростей на плоскости.

## 5. Заключение.

В настоящее время завершается исследование сходимости по сетке. Уже очевидно, что в текущей постановке задачи потребуется расчетная сетка более чем в 50 миллионов ячеек. Следующий этап исследований будет направлен на лучшее понимание процессов, приводящих к понижению сил трения: будут проведены сравнительные расчеты неподвижных гладкой сферы и двух мячей с разной глубиной лунок. Очевидно, что для перехода к расчетам подвижных мячей необходимо минимизировать потери на перестроение расчетной сетки, соответствующее решение уже реализуется, переработан механизм обновления положения подвижного тела.

Перед промышленностью стоит множество ресурсоемких задач, для успешного их решения необходимы не только ранее не доступные аппаратные средства, но и программные продукты, способные наиболее эффективно использовать имеющиеся ресурсы. FlowVision-НПС уже сейчас может быть успешно применен для решения реальных промышленных задач, развитие программного комплекса не останавливается, а улучшение масштабируемости - одна из важнейших задач, стоящих перед разработчиками.



## **Литература**

1. Flight Mechanics of a Spinning Dimpled Spheroid John C. Adams, Jr., Ph.D. Life Fellow Duffer Highland Rim Section
2. Лойцянский Л. Г., Механика жидкости и газа – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840с., 311 ил., 22 табл.