

Массовые суперкомпьютерные технологии – основа конкурентоспособности национальной экономики в XXI веке

В.Б. Бетелин, Е.П. Велихов, А.Г. Кушниренко

1. Супер-ЭВМ терафлопного класса на основе массовых компьютерных технологий

До начала 90-х годов прошлого века супер-ЭВМ представляли собой уникальные изделия, разработанные и производимые на основе предельно достижимых технологических норм, что являлось основной причиной их высокой стоимости и относительно малого объема производства. Как следствие, супер-ЭВМ были доступны только ограниченному кругу специалистов крупных предприятий и научно-исследовательских учреждений.

В 1995 году в рамках программы Поддержки Высокопроизводительных Вычислений и Коммуникаций (НРСС), по заказу Департамента Энергетики США, компания INTEL разработала супер-ЭВМ "INTEL-PARAGON" производительностью 0.14 Тфлопс на основе четырех тысяч параллельно работающих массовых коммерческих микропроцессоров [1]. Тем самым была доказана принципиальная возможность создания супер-ЭВМ на основе массовых компьютерных технологий.

Реализация сформулированной в 1996 году в программе ASCI [2] концепции создания супер-ЭВМ на базе масштабируемой сети параллельно работающих массово производимых микропроцессоров в течение десяти лет обеспечила достижение беспрецедентно высокого для супер-ЭВМ роста показателя производительность/стоимость: 350-кратное увеличение производительности су-

пер-ЭВМ с 1 Тфлопс в 1996 году до 350 Тфлопс в 2006 году и одновременно 60-кратное снижение стоимости одного Тфлопс с \$ 30 млн. в 1996г. до \$ 0,5 млн. в 2006 г.

Столь стремительный рост технико-экономических характеристик супер-ЭВМ терафлопного класса сделал для основной массы инженеров и ученых возможным повседневное применение таких моделей и расчетных схем в проектировании новых изделий и в научных исследованиях, которые ранее для этой цели использовать было экономически нецелесообразно или практически невозможно. Например, в материаловедении все шире применяются методы молекулярной динамики, позволяющие отслеживать временную эволюцию систем взаимодействующих атомов, молекул или виртуальных частиц путем интегрирования их уравнений движения (классических или квантово-механических) [3]. Применение подобных методов уже на существующих супер-ЭВМ позволяет путем численного эксперимента предсказать изменение любых заданных параметров физического процесса с заданной точностью. Впечатляющий пример практического использования метода молекулярной динамики продемонстрировали специалисты IBM в Цюрихе для исследования двуокиси гафния в качестве кандидата для затвора транзисторов нового поколения [4].

В процессе исследования на супер-ЭВМ BLUE GENE/L с 4096 параллельно работающими микропроцессорами было проведено

моделирование взаимодействия двуокиси гафния с кремнием. В ходе компьютерного эксперимента было использовано 50 моделей силикатов гафния, в каждую из которых входило до 600 атомов и 5000 электронов. Вычисление одного значения диэлектрической постоянной требовало пяти дней непрерывной работы супер-ЭВМ, поэтому завершение полного цикла моделирования потребовало около 250 дней. (Для сравнения - самому мощному персональному компьютеру потребовалось бы на решение этой задачи 700 лет). В результате была получена ясная картина основополагающих физических процессов, определяющих уникальные электрические свойства гафния при взаимодействии с кремнием.

Таким образом, это один из первых в мире опытов проведения сложного физико-химического исследования в "виртуальной лаборатории" без использования традиционного лабораторного оборудования и при полном отсутствии проблем, присущих лабораторным экспериментам, таким как влияние условий подготовки, чистота компонентов и присутствие паразитных реакций.

Другим не менее впечатляющим примером использования суперкомпьютерных технологий в процессе разработки новых изделий машиностроения является создание перспективного пассажирского лайнера Боинг-787 [5]. В апреле 2004 года руководством корпорации Боинг было принято решение о создании этой новой машины по уплотненному четырехлетнему графику: завершение проектирования и подготовки производства – 2006 г; первый полет серийного образца лайнера – 2007 г., первые поставки заказчикам – 2008 г. В процессе проектирования лайнера затраты на высокопроизводительную обработку данных составили около **800000 так называемых Cray-часов, что эквивалентно непрерывной трехлетней работе более 50 супер-ЭВМ в течение двух лет.** В 2006 году были успешно проведены виртуальные (компьютерные) изготовление и сборка Боинг-787. Планируемый показатель коммерческой загрузки Боинг-787 на 45% выше, чем у А330-200. Использование результатов моделирования на супер-ЭВМ авиационных двигателей позволило снизить на 20%

потребление топлива и объем вредных выбросов двигателей Боинг-787, а также улучшить на 8% их эксплуатационные показатели.

В Европе в последние годы также начинает интенсивно разворачиваться освоение технологий высокопроизводительной обработки данных как в поисковых работах университетов, так и в конкретных проектах промышленности, рассчитанных на ближайшее будущее (2010-2012 гг.).

Одно из подразделений компании BMW разрабатывает болиды для Формулы-1. Это подразделение владеет аэродинамической трубой, используемой для оптимизации аэродинамических свойств создаваемых моделей. Для разработки новой модели болида Формулы-1 BMW-Sauber потребовался увеличенный объем испытаний. Вместо покупки и содержания второй аэродинамической трубы компания разработала и в 2007 году ввела в эксплуатацию "виртуальную" аэродинамическую трубу, которая заменяет натурные испытания моделированием процессов трехмерного обтекания и сопутствующего теплоотвода на супер-ЭВМ. Для целей оптимизации конструкции болидов Формулы-1 оказалась достаточной производительность 12 Тфлопс. Супер-ЭВМ такой производительности - Albert2 - была поставлена швейцарской компанией *Dalco AG* в сотрудничестве с компанией *INTEL* и по состоянию на начало 2007 года оказалась **мощнейшей в Европе супер-ЭВМ, установленной в промышленности** [6].

В Кембриджском университете в настоящее время ведется перспективная разработка малошумного пассажирского авиалайнера совершенно новой конструкции, в которой все компоненты конструируются в расчете на максимальное понижение генерируемого самолетом шума во всех режимах полета. Работы ведутся с помощью компьютерного моделирования и виртуального прототипирования. Изготовленные по компьютерной модели уменьшенные фрагменты конструкции испытываются в аэродинамической трубе. Разработка осуществляется в сотрудничестве с Массачусетским Технологическим Институтом. Первый этап работ планируется завершить в 2008 году [7].

В Великобритании в одном из университетов г. Глазго (*Strathclyde University*) усилиями

13-ти европейских государств была организована "виртуальная верфь". Используя вычислительные мощности и программное обеспечение, предоставленные университетом, инженеры из разных стран в режиме удаленного доступа создали принципиально новую конструкцию пассажирского паромов. Паром будет транспортировать 2000 пассажиров и 300 легковых автомобилей со скоростью 38 узлов, что на 8 узлов выше средней скорости существующих паромов. Руководитель проекта, профессор кафедры проектирования и конструирования А. Даффи, оценивает выполненный проект следующим образом: "Опыт успешного использования разработанных в проекте виртуальных технологий показывает, *что Европа может и должна вернуть себе утраченное лидерство в судостроении*" [8].

В соответствии с общеевропейской программой "6" развития новых технологий, в 2005 году был образован европейский консорциум "VERDI", в который входят 6 университетов, 6 разработчиков и производителей авиационных двигателей и 3 исследовательских института. Цель консорциума - за 4 года разработать новое поколение инженерных технологий для того, чтобы обеспечить Европе лидирующую позицию в двигателестроении. Ключевая идея новых технологий – создание полного производственного цикла виртуального конструирования и испытаний двигателей и последующего "безошибочного" изготовления. Стоимость всего проекта - около 6 миллионов евро, из которых 4,5 миллиона будет выделено из фондов Евросоюза [9].

2. Высокопроизводительные вычисления и глобальная конкурентоспособность

Именно эта ключевая проблема стала в последние годы объектом интенсивных исследований "Совета по конкурентоспособности Экономике США". Совет является влиятельной надпартийной некоммерческой организацией, в которую входят директора крупных компаний, профсоюзные лидеры и ректоры ведущих университетов. Основная цель его деятельности - подготовка действий, ведущих к упрочению лидерства США на глобальном рынке.

Недавний отчет Совета, посвященный автомобильной промышленности, опубликован под девизом "Кто слаб в вычислениях, тот неконкурентоспособен" [10]. С целью обеспечения доминирования производителей США на мировом автомобильном рынке в этом отчете исследовалась проблема тотального моделирования и оптимизации конструкции автомобиля.

Было констатировано, что современные автопроизводители уже экономят миллионы долларов и месяцы разработки, например, моделируя столкновения (crash-тесты) на супер-ЭВМ. Сегодняшние методологии немыслимы без последовательного проведения различных виртуальных испытаний для определения важнейших характеристик разрабатываемой конструкции. Эти испытания проводятся с помощью различных программных систем и требуют подготовки данных в различных форматах. Однако, несмотря на очевидные выигрыши от применения высокопроизводительных ЭВМ, разработчики сталкиваются с тем, что рыночные требования и государственные ограничения во многом противоречат друг другу

Прогнозируемый в ближайшие годы прорыв случится, когда весь процесс моделирования и оптимизации конструкции и подготовки производства будет проводиться в единой системе. Внедрение этой методики принесет громадную экономию средств на подготовку новых моделей и сократит сроки разработки с достигнутых сегодня лидерами мирового автомобилестроения 2,5 лет до 15 месяцев (в восьмидесятых годах прошлого века это занимало 5 лет).

То, что внедрив эту методику американские производители сэкономят затраты на разработку, – лишь незначительная часть выигрыша. Гораздо важнее, что американские автопроизводители будут более оперативно откликаться на требования времени, смогут производить более "подогнанные" под запросы индивидуального покупателя грузовики и легковые автомобили при обеспечении приемлемых цен и в итоге смогут увеличить американскую долю мирового авторынка.

Финансируемые правительством США исследования показали, что увеличение доли рынка всего на один процент будет ежегодно приносить стране около 4,5 млрд. долларов и создаст десятки тысяч новых рабочих мест.

Из вышеизложенного очевидно следует, что необходимым условием конкурентоспособности продукции автомобильной промышленности России является создание и использование адекватных отечественных суперкомпьютерных технологий.

В декабре 2005 года состоялось рабочее совещание представителей семи национальных лабораторий США – участников ведущейся с 1996 г. «оружейной» программы ASCI - под девизом "Суперкомпьютерные вычисления – ключ к ядерной энергетике 21 века" [11].

Основная тема обсуждения – «конверсия» фундаментальных достижений этой военной программы в сферу «мирной» атомной энергетики. В связи с этим обстоятельством можно прогнозировать, что успехи США в направлении суперкомпьютерного моделирования в скором времени могут начать использоваться для вытеснения России с мирового рынка АЭС. Для этого в условия тендеров на поставку/постройку АЭС достаточно включить требование наличия документированных методик и результатов моделирования на супер-ЭВМ как штатных эксплуатационных режимов, так и сценариев проектных и запроектных аварий. ***Не имея таких методик и технологий, российская атомная энергетика может уже в ближайшей перспективе начать терять экспортный потенциал.***

Перспективные энергетические реакторы на быстрых нейтронах, реакторы-дожигатели, другие установки, необходимые для замыкания цикла ядерного топлива в XXI веке, будут разрабатываться с использованием принципов "встроенной безопасности". Разработка физической основы и инженерной реализации подобных принципов в принципе невозможна без детального моделирования, выполнимого только на мощных супер-ЭВМ.

Конкуренты России на рынке атомной энергетики в ближайшее время начнут использовать детальное моделирование на супер-ЭВМ как эффективное средство оптимизации экономических показателей: удельных капиталовложений на 1КВт генерируемой электрической мощности, эксплуатационных расходов на выработку 1КВт/ч электроэнергии, коэффициента использования установленной мощности (КИУМ). Без ос-

воения технологии моделирования на супер-ЭВМ ***отечественные энергоблоки большой единичной мощности начнут заведомо проигрывать по оптимизированным конкурентами на супер-ЭВМ показателям.***

Кроме того, недостаточная интенсивность проводимых в России работ по моделированию на супер-ЭВМ в интересах атомной энергетики не позволит российским специалистам «на равных» принять участие в работах по моделированию, предусмотренных в программе США GNEP, в европейской программе "Generation IV", в других международных программах, не позволит получить полноценный доступ к мировому опыту в этой области, не позволит принять полноправное участие в международных организациях, вырабатывающих «правила игры» на мировом энергетическом рынке.

Национальный Исследовательский Совет (The National Research Council), представляющий собой подразделение Национальной академии США, является основным агентством, публично выражающим точку зрения Национальной академии и влияющим на решения федерального правительства, требующие научной или технической экспертизы. По запросам федеральных агентств и по собственной инициативе Совет регулярно проводит исследования научных и технологических тенденций, могущих оказать существенное влияние на состояние дел в области национальной безопасности США как в гражданской, так и в военной областях. Анализ опубликованных за последние десять лет отчетов Совета показывает, что за этот период значительно возрос интерес всех федеральных агентств США, в том числе Министерства обороны, к исследованиям в области интеграции методов разработки новых материалов, конструирования и изготовления машиностроительных изделий с использованием моделирования на супер-ЭВМ. Результаты комплексного исследования этой проблемы, изложенные в отчете [12], можно сформулировать следующим образом.

Разделенные ранее во времени и организационно процессы разработки материалов, конструирования, изготовления, испытаний и поддержки в течение жизненного цикла сложных инженерных изделий, в частности, новых сис-

тем вооружения, в среднесрочной перспективе будут проинтегрированы с помощью новых информационных технологий с использованием сверхвысокопроизводительных супер-ЭВМ.

Важнейшим следствием этой интеграции будет радикальное улучшение технико-экономических характеристик разрабатываемых изделий за счет одновременной оптимизации свойств материалов, конструкций и процесса изготовления.

3. Проблемы создания суперкомпьютерных технологий в условиях рыночной экономики

В 1982 году по заказу ряда федеральных агентств США (обороны, энергетики, науки и космоса) группа ведущих ученых из национальных лабораторий, промышленности и университетов США, возглавляемая известным ученым П. Лаксом, подготовила отчет по проблеме развития технологий высокопроизводительной обработки данных [13]. В отчете, в частности, были перечислены важнейшие научные и инженерные задачи, решение которых на высокопроизводительных ЭВМ предположительно должно было дать в будущем большой технический и экономический эффект. В отчете был проведен экономический анализ суперкомпьютерной индустрии США и констатировано, что рыночные механизмы не способны обеспечить развитие суперкомпьютерных технологий на уровне, необходимом для обеспечения национальной безопасности. В этой связи в отчете было предложено увеличить объем федерального финансирования на развитие и приобретение высокопроизводительных ЭВМ, а также обеспечить общенациональную координацию работ в этой области.

Одним из наиболее важных явных следствий публикации и обсуждений этого отчета было создание в 1985 г. Федеральным агентством по науке сети из 5-ти суперкомпьютерных центров в ведущих университетах США. Неявным следствием оказалась выработка в 1985-86 г.г. общих принципов и создание к 1990 году первого поколения сети Интернет, что обеспечило общенациональный доступ к федеральным суперкомпьютерным центрам.

В 1991 году в США был принят закон о федеральной поддержке высокопроизводительных вычислений (Public Law 12-194, the High Performance Computing Act of 1991, [14]). В преамбуле текста закона говорится, что он призван *«обеспечить постоянное и непрерывное лидерство США в области создания и использования высокопроизводительных вычислений»*. Этот закон и последующие дополнения к нему обязали Президента США развернуть федеральную Программу Поддержки Высокопроизводительных Вычислений и Коммуникаций НРСС (позднее переименована в NITRD [15]). В 1992 году цель программы была сформулирована следующим образом: *«ускорить развитие новых поколений высокопроизводительных компьютеров и вычислительных сетей для использования федеральными организациями и американской экономикой в целом»*.

Программа НРСС координирует подпрограммы 13 федеральных агентств, включая National Sciences Foundation, Department of Energy, Department of Defence. Кроме того, при Президенте США был создан независимый Общественный Совет, который раз в два года представляет президенту отчет о ходе выполнения программы и предложения по ее корректировке.

В течение последних десяти лет в рамках этих программ ежегодно выделялись многие сотни миллионов долларов как на разработку масштабируемых супер-ЭВМ и масштабируемых приложений для них, так и на закупку супер-ЭВМ и ПО для федеральных нужд, в том числе и национальных лабораторий, базирующихся в университетах. Например, годовой бюджет программы ASCI к 2001 году составил около одного миллиарда долларов. В августе 2006 года правительство США приняло решение о закупке супер-ЭВМ для федеральных нужд на многие сотни миллионов долларов. С привлечением средств федерального бюджета США в ближайшие несколько лет планируется «суперкомпьютеризация» системы университетского образования, т.е. установка в каждом университете супер-ЭВМ класса 1-10 Тфлопс, а в ведущих университетах класса – 50-100 Тфлопс (на конец 2006 года в 29 американских университетах установлены 36 супер-ЭВМ, входящих в список TOP500 [16]).

4. Состояние дел в области суперкомпьютерных технологий в России

В России масштабы и уровень координации работ в области суперкомпьютерных технологий явно недостаточны для решения каких-либо крупных национальных задач, например, обеспечения лидерства национального машиностроительного комплекса на мировом рынке. В настоящий момент уровень оснащенности промышленности, науки и системы образования суперкомпьютерными мощностями недопустимо низок. Так, например, из 500 ЭВМ последнего опубликованного списка TOP500 (осень 2006г. [16]) в США установлено 360 супер-ЭВМ, в Европе – 100, в России – всего лишь 2 супер-ЭВМ, занимающие по производительности 100-е и 400-е места. Эти две самые мощные российские супер-ЭВМ установлены в Российской академии наук и в Сбербанке, но не в промышленности (в 2007 году к этим двум супер-ЭВМ мирового класса добавилась третья, установленная в Томском государственном университете). В тех случаях, когда на отдельных промышленных предприятиях России установлены супер-ЭВМ, их производительность низка. Так, например, один из лидеров отечественного двигателестроения НПО «Сатурн» в 2001 году приобрел ЭВМ с пиковой производительностью 0.9 Тфлопс. Для сравнения: трехмерная модель авиационного двигателя, разработанная для компании Пратт-Уитни в Стенфордском университете в рамках гражданского раздела программы ASCI, реализована на супер-ЭВМ BLUE GENE/L с пиковой производительностью 350 Тфлопс.

Таким образом, обеспечение конкурентоспособности продукции машиностроительного комплекса России на мировом рынке требует незамедлительного принятия на государственном уровне адекватного комплекса мер по созданию отечественных технологий высокопроизводительной обработки данных, ориентированных на создание конкретных изделий (атомная энергетика, газотурбинные двигатели и т.д.), а также по развертыванию производства и закупке у отечественных производителей необходимого количества масштабируемых

супер-ЭВМ и масштабируемых приложений для научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро и высших учебных заведений.

Необходимый научно-технический задел для решения этой задачи в России имеется, так как в течение последних 10-ти лет предпринимались достаточно систематические усилия по освоению современных суперкомпьютерных технологий. Действительно, уже в первой половине 90-х годов в Институте прикладной математики (ИПИ) РАН и Институте автоматизации проектирования (ИАП) РАН велись работы по созданию технологий высокопроизводительных вычислений на супер-ЭВМ гигафлопной производительности. В 1999 году в Российской академии наук был создан межведомственный суперкомпьютерный центр (МСЦ РАН) [17], оснащение которого вычислительной техникой проводилось при участии НИИ «Квант». Коллективы исследователей из пяти десятков организаций страны дистанционно используют ресурсы центра и приобретают опыт работы на супер-ЭВМ терафлопного класса. В 2000-ом году была развернута суперкомпьютерная программа «СКИФ» Союзного государства [18]. В программу «СКИФ» были вовлечены ряд предприятий и учреждений от России и Белоруссии, головным исполнителем от Российской Федерации в Программе «СКИФ» был Институт программных систем Российской академии наук. В рамках программы был разработан комплект программной и конструкторской документации для суперкомпьютеров семейства «СКИФ», выпущено 16 опытных образцов, включая суперкомпьютер СКИФ К-1000 производительностью 2,5 Тфлопс, который на ноябрь 2004 г. занимал 98 место в списке TOP500. В феврале 2007 года в Томском государственном университете российской компанией Т-Платформы с участием ИПС РАН сдан в эксплуатацию самый мощный на сегодня суперкомпьютерный центр в России на базе супер-ЭВМ СКИФ Cyberia с производительностью 12 Тфлопс. В запланированной на 2007–2010 гг. программе «СКИФ-ГРИД» Союзного государства предполагается дальнейшее повышение производительности супер-ЭВМ отечественной сборки.

Ведется в России и освоение методик создания программного обеспечения супер-ЭВМ. В 1999 г. РФФИ была начата программа «Программное обеспечение супер-ЭВМ и суперкомпьютерных центров», целью которой являлось создание алгоритмов и программного обеспечения для параллельных вычислений [19]. РФФИ поддержаны разработки программных комплексов для супер-ЭВМ в ряде ведущих научных организаций, в числе которых НИИ «Квант», ФГУП ЦИАМ, СПбГТУ, НИВЦ МГУ, институты Российской академии наук ИПС РАН, ИАВП РАН, ИСП РАН, ИПМ РАН, ВЦ РАН, ИММ РАН, ИМПБ РАН. Этими организациями велась «точечная» разработка нескольких современных программных комплексов различного назначения: для решения многомерных задач газовой динамики; для моделирования физических процессов в газотурбинном двигателе; для анализа структуры параллельных алгоритмов и других.

5. Предпосылки для вступления России в мировой «суперкомпьютерный клуб»

Системообразующим элементом современной супер-ЭВМ является микропроцессор. Основные характеристики супер-ЭВМ – надежность, производительность, энергопотребление, эффективность на заданных классах задач - во многом определяются характеристиками микропроцессора.

Сегодня только две страны в мире – США и Япония - разрабатывают супер-ЭВМ на микропроцессорах собственной разработки и производства и, тем самым, определяют направления и темпы развития мировых суперкомпьютерных технологий. В 2008 году к этому «элитному» клубу планирует присоединиться Китай, с 2002 года разрабатывающий собственные микропроцессоры семейства Godson (Дракон) [20].

Опыт создания и эксплуатации масштабируемых супер-ЭВМ на основе заимствованных технологий, накопленный в Межведомственном суперкомпьютерном центре РАН, Институте программных систем РАН, Научно-исследовательском вычислительном центре МГУ, компании Т-платформы и т.д., а также научно-технический задел в области создания

64- и 128-разрядных микропроцессоров, имеющийся в Научно-исследовательском институте системных исследований РАН, являются достаточной основой для создания в сжатые сроки масштабируемой супер-ЭВМ на отечественной элементной базе производительностью до 100 Тфлопс.

На порядок более трудной задачей представляется создание полного комплекта прикладного программного обеспечения и методики его использования, необходимых для получения «прорывных» результатов в области разработки изделий машиностроения, конкурентоспособных на мировом рынке. Для решения этой задачи потребуются создание коллективов теоретиков, экспериментаторов, конструкторов и технологов, вычислителей и программистов для разработки методов детального предсказательного моделирования, позволяющих радикально улучшить характеристики разрабатываемых машиностроительных изделий, а также развитие экспериментальной базы, необходимой для верификации разрабатываемых методов детального предсказательного моделирования.

Принятие в 2007 году закона о государственной поддержке работ в области высокопроизводительной обработки данных и развертывание в этот же период российского аналога программы НРСС с адекватным объемом финансирования позволило бы к 2012 году обеспечить российским машиностроителям приемлемый паритет в этой области с мировыми лидерами и создать необходимые условия для обеспечения конкурентоспособности российских изделий на мировом рынке.

Литература

1. Супер-ЭВМ Intel Paragon.
<http://www.top500.org/orsc/1997/paragon.html>¹
2. Программа ASCI.
http://www.sandia.gov/NNSA/ASC/pubs/progplan_FY96.html
3. Молекулярная динамика.
http://en.wikipedia.org/wiki/Molecular_dynamics
4. Новости ИБМ, ЦЮРИХ, Швейцария, 26 февраля 2007 г. «Моделирование на суперкомпьютерах ИБМ помогает создавать революционные полупроводниковые технологии» <http://www.ibm.com/news/ru/ru/2007/02/2603.html>

¹ Все Интернет-ссылки даны по состоянию на 13 мая 2007 года

5. Боинг 787. http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_787
6. HPCwire, December 15, 2006 «BMW Sauber Unveils New Supercomputer for Automotive Design»
<http://www.hpcwire.com/hpc/1158325.html>
7. University of Cambridge, Engineering Department News, 24 May 2006 «Racing Green»
http://www.eng.cam.ac.uk/news/stories/2006/racing_green/
8. University of Strathclyde, PRIZM No 220/November-December 2006 «First ship emerges from virtual shipyard»
http://www.strath.ac.uk/media/media_42720_en.pdf
9. VERDI - research project within the European 6th Framework Program. <http://www.verdi-fp6.org/>
10. Report of The Council of Competitiveness: «Full Vehicle Design Optimization for Global Market Dominance»
http://www.compete.org/pdf/HPC_Full_Design.pdf
11. A Workshop Sponsored by Seven DOE National Laboratories and the DOE Office of Science, December 14-16, 2005, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California
https://eed.llnl.gov/nuclear_workshop/
12. Отчет Национального Исследовательского Совета Академии наук США: «Retooling Manufacturing: Bridging Design, materials, and Production». The National Academic Press, 2004
http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=11049
13. Открытая часть отчета Питера Лакса 1982 года:
http://www.pnl.gov/scales/docs/lax_report_1982.doc
14. Public Law 102-194, the High Performance Computing Act of 1991, The Summary:
http://www.nitrd.gov/congressional/laws/pl_102-194.html
15. The Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) Program:
http://www.nitrd.gov/about/about_NITRD.html
16. Проект Top500 – обновляемый список пятисот самых производительных супер-ЭВМ мира.
<http://www.top500.org>
17. Межведомственный суперкомпьютерный центр Российской академии наук. <http://www.jscc.ru/>
18. Суперкомпьютерная программа СКИФ Союзного Государства. <http://skif.pereslavl.ru/>
19. РФФИ, Программа «Программное обеспечение супер-ЭВМ и суперкомпьютерных центров».
http://www.rfbr.ru/default.asp?doc_id=4551
20. http://www.engagingchina.com/blog/hitech/_archives/2007/3/29/2844408.html

Бетелин Владимир Борисович. Родился в 1946 году. Окончил Московский государственный университет им. Ломоносова в 1970 году. Доктор физико-математических наук, академик. Автор более 85 научных работ, в том числе 6 монографий. Директор НИИСИ РАН, вице-президент Российского научного центра «Курчатовский институт».

Велихов Евгений Павлович. Родился в 1935 году. Окончил Московский государственный университет им. Ломоносова в 1958 году. Доктор физико-математических наук, профессор, академик. Академик-секретарь Отделения информационных технологий и вычислительных систем, президент Российского научного центра "Курчатовский институт", вице-президент Российского союза промышленников и предпринимателей, Секретарь Общественной палаты РФ.

Кушниренко Анатолий Георгиевич. Родился в 1944 году. Окончил Московский государственный университет им. Ломоносова. Кандидат физико-математических наук. Автор более 50 научных трудов и учебников для высшей и средней школы, изданных суммарным тиражом более 8 млн. экземпляров. Доцент Механико-математического факультета МГУ, заведующий отделом НИИСИ РАН.