

ТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ

# КОНСТРУКТОР

# МАШИНОСТРОИТЕЛЬ

ИНФОРМАЦИОННО - АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ



## ПРИВОДЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫХ СТАНКОВ

Еще немного о линейных двигателях

## ЕВРОПЕЙСКИЕ МОТОР-РЕДУКТОРЫ

Сделано в Италии

## СТОИТ ЛИ ИЗГОТОВЛИВАТЬ ФУРНИТУРУ?

Как не распылиться по мелочам

## РЕМЕННЫЕ ПЕРЕДАЧИ В СОВРЕМЕННЫХ МАШИНАХ И АГРЕГАТАХ

Шкивы для зубчатоременных передач



МАРТ 2006

Боровков А.И., проф., к.т.н.

зав. лаб. «Вычислительная механика» (CompMechLab)

СПбГПУ

# PLM-ТЕХНОЛОГИИ, КОМПЬЮТЕРНЫЙ ИНЖИНИРИНГ И ГЛОБАЛЬНЫЙ АУТСОРСИНГ

## PLM, CAE and Global Outsourcing

*This is the first article in a series of professor Borovkov (the chief of laboratory «CompMechLab», Saint-Petersburg State Polytechnical University) publications in our magazine. The author consecrates their transactions to actual problems of global outsourcing and Computer-Aided Engineering (CAE) in field of Product Lifecycle Management (PLM).*

### Часть 2. Глобализация и компьютерный инжиниринг как основные ускорители развития PLM-технологий

Сегодня один из лидеров авиационной и ракетно-космической промышленности корпорация Boeing сформулировала амбициозную цель «... перейти от шестидесятимесячного цикла создания изделия к двенадцатимесячному и сделать за \$1 млрд. то, что ... сделали последний раз за \$6-7 млрд.», т.е. сократить сроки разработок в 5 раз, снизив при этом стоимость в 6-7 раз. В частности, корпорация Boeing заключила с компаниями

Dassault Systemes и IBM самый крупный контракт в современной PLM-индустрии на использование PLM-системы CATIA 5.0 в рамках среды виртуальной разработки и сопровождения изделий Global Collaboration Environment (GCE) с целью проектирования и сопровождения на протяжении 30-летнего жизненного цикла нового самолета Boeing 787, получившего известность под именем 7E7 Dreamliner (стоимость контракта оценивается

в несколько десятков миллионов долларов). С помощью совместного использования GCE-среды и VPD-технологий виртуальной разработки изделий инженеры Boeing, расположенные в разных странах мира, эффективно взаимодействуют и практически «в реальном времени» работают совместно, выполняя одновременно компьютерное проектирование и моделирование, общую компоновку и проверку всех компонентов нового самолета Boeing 787.

Достижения компаний-лидеров объясняются прежде всего активной ролью высшего руководства компаний при внедрении PLM-технологий, существенным изменением образа мышления сотрудников и стиля работы отдельных подразделений, и, конечно же, значительными финансовыми затратами на приобретение вычислительной техники (Hardware) и программного обеспечения (Software), регулярное повышение квалификации сотрудников, услуги консультантов и техническую поддержку. Но эти усилия и затраты на внедрение PLM-технологий только в США, по оценкам аналитической компании AMR Research, позволяют увеличить размеры совокупной прибыли

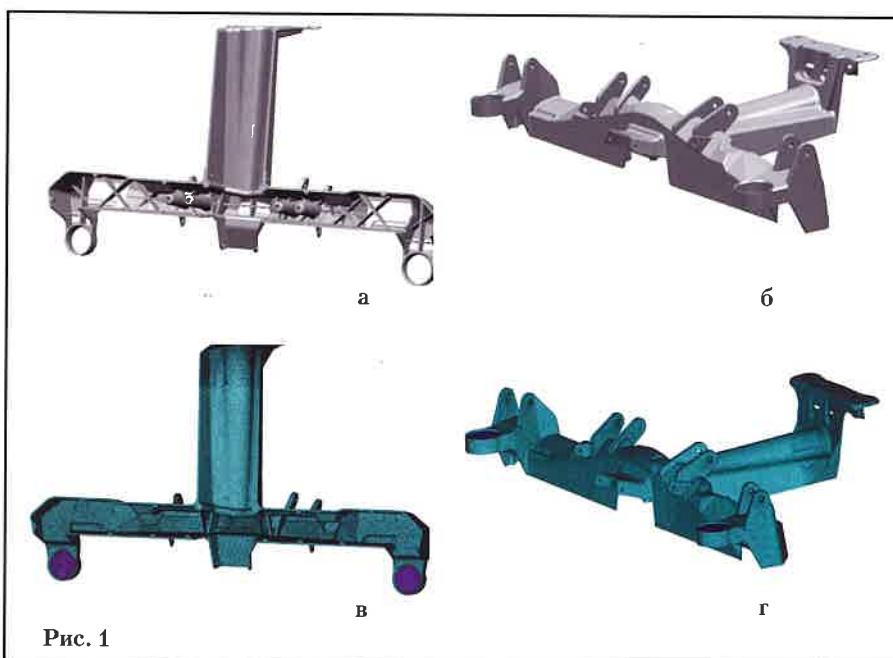


Рис. 1

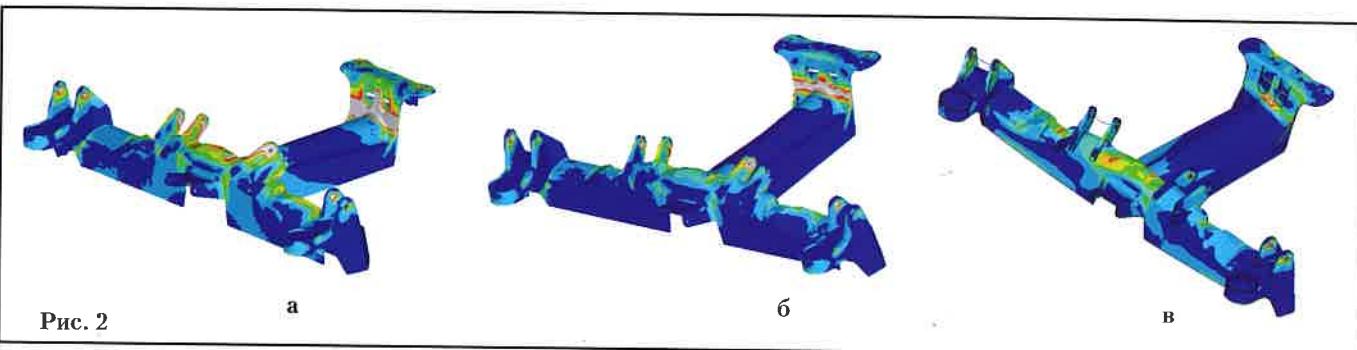


Рис. 2

промышленных предприятий более, чем на \$100 млрд.

Разные экспертино-аналитические фирмы, оценивая развитие рынка PLM-технологий приходят к единому выводу: PLM-рынок растет и будет устойчиво расти в ближайшие годы (CIMdata оценивает темпы роста в 7,5% в год, Daratech – по 8% в год вплоть до 2008 года, а ARC Advisory Group – 11,5%); AMR Research полагает, что к 2008 году организации с годовым оборотом менее \$1 млрд. инвестируют в PLM-технологии более \$5 млрд.

При анализе этих результатов важно понимать, что многие производственные компании ищут программные решения, которые аналитическая компания Daratech относит к классу «3-6-9», т.е. те, которые можно внедрить за 3 месяца, окупить – за 6 месяцев и начать получать прибыль от финансовых инвестиций – за 9 месяцев. Достаточно, очевидно, что все основные компоненты PLM-систем (CAD/CAM-, CAE- и PDM-системы) дорогостоящи, требуют длительного внедрения и обучения, а потому, как правило, не принадлежат к классу «3-6-9».

Однако следует отметить, что PLM-сегмент растет более высокими темпами, чем рынок программного обеспечения в целом, т.к. в области CAD/CAM-, CAE- и PDM-систем перестало ощущаться влияние отложенного спроса и рынок вступает в более зрелую и стабильную фазу развития в рамках процессов глобализации рынков и обострения конкурентной борьбы.

Еще одним доказательством перспективности мирового рынка PLM-технологий стал тот интерес,

который проявила фирма Microsoft, не обращавшая раньше особого внимания на этот сегмент рынка, видимо, потому, что по ее меркам объем данной отрасли сравнительно невелик – всего около 4% мирового рынка программного обеспечения. Но в 2005 году софтверный гигант вступил в стратегический альянс с Dassault Systèmes, заключил партнерские соглашения с UGS и Autodesk, а с последней компанией к тому же обменялся патентными лицензиями. Достаточно очевидно, что Microsoft решила укрепить свои позиции в промышленном секторе. «Мы постараемся сделать PLM-продукты доступными для более широкого круга промышленных предприятий», – заявил Билл Гейтс при объявлении союза с Dassault Systèmes.

Принципиально важно отметить, что проблема эффективного

внедрения и применения PLM-технологий в России является системной и в условиях быстроразвивающихся передовых технологий затрагивает:

- образование, научные исследования и промышленные разработки;
- внутренний и внешний рынки, особенно, учитывая специфические моменты эпохи глобализации;
- продукцию как гражданского, так и военного назначения;
- проблемы постоянного сохранения конкурентоспособности как специалистов и выпускаемой продукции, так и организаций в целом (ВУЗы, КБ, промышленные предприятия, научно-внедренческие и консалтинговые фирмы, и т.д.) во всех сферах их деятельности.

Популярности и развитию рынка PLM-технологий кроме блестящих примеров лидеров мирового

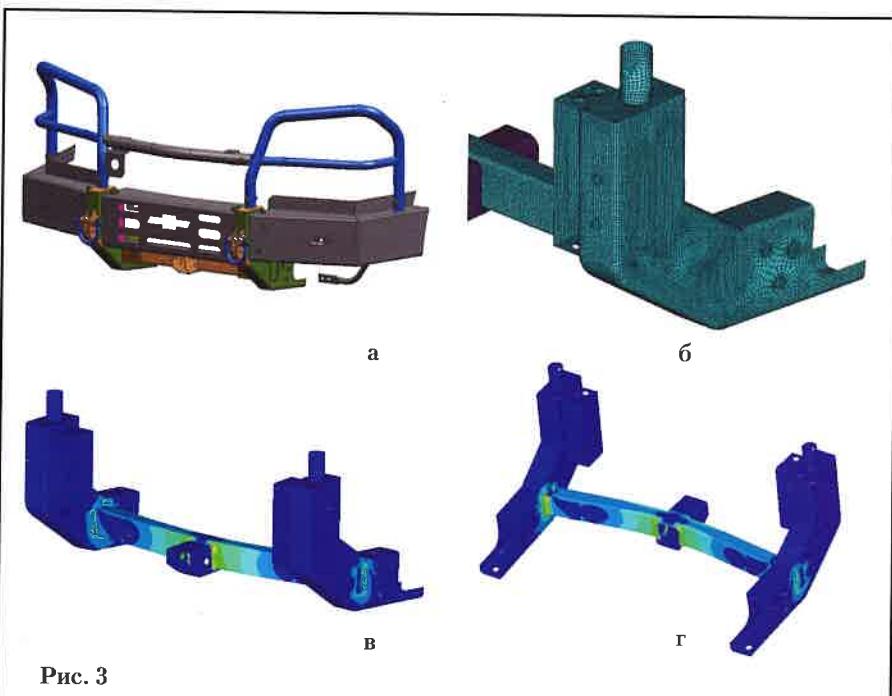
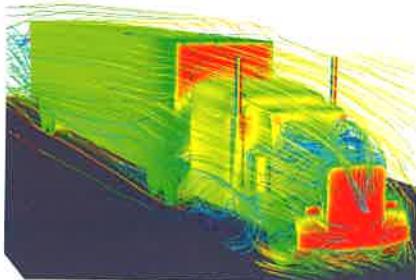
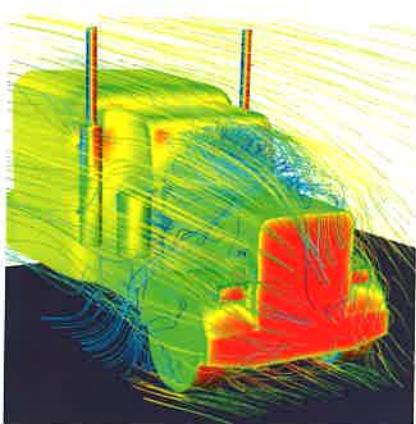


Рис. 3



а



б



в

Рис. 4

б

в

производства способствуют и нарастающие процессы глобализации, а точнее, такая современная тенденция, как усиление международного разделения труда. Отчеты многих аналитических компаний свидетельствуют, что в последнее время неуклонно растет объем работ, передаваемых для выполнения за рубеж («субконтрактинг», «аутсорсинг»), как правило, в те страны, где высококвалифицированная рабочая сила стоит дешевле.

Чтобы выжить в условиях жесточайшей конкуренции многие зарубежные предприятия вынуждены отдавать часть своих работ в страны с более низкими затратами на их выполнение. Обязательным условием становится соблюдение оговоренных сроков и высокое качество исполнения (достаточно упомянуть общеизвестные международные стандарты качества ISO и методологию Six Sigma, а также практически неизвестную в России КАЙДЗЕН-технологию постоянно го совершенствования как основу «японского чуда»).

Так, уже в 2004 году американские компании заплатили свыше

\$70 млрд. только за то, «чтобы их работу выполнил кто-то другой». По данным журнала Design Magazine, 66% американских производителей уже начали экспорттировать инженерные работы, выполненные с помощью CAD/CAM- и CAE-систем, а по оценкам аналитической компании IDC, число промышленных предприятий в США, применяющих аутсорсинг, прирастает в последнее время примерно на 10% ежегодно; при этом проектирование и инженерный анализ входят в ведущую тройку из перечня научкоемких контрактов, которые целесообразно передавать на аутсорсинг.

Уточним что означает термин аутсорсинг (outsourcing) – оказание необходимых услуг в течение определенного времени по согласованной цене. Основными причинами аутсорсинга, как правило, являются желание фирмы использовать самые последние достижения современных технологий, нехватка высококвалифицированного персонала, способного в сжатые сроки решить задачи освоения и внедрения современных технологий, и, наконец, острая потребность в снижении затрат.

В настоящее время уже ни у кого не вызывает сомнения, что глобализация – объективная тенденция, и она быстро набирает силу, причем если заказы на офшорное программирование в подавляющем большинстве случаев попадают в Индию, Сингапур, Малайзию, Китай, Тайвань и другие страны, имеющие высокие темпы роста ИТ-технологий, то для аутсорсинга научкоемких инженерных работ весьма привлекательны именно российские специалисты, лучшие из которых имеют хорошее инженерное образование и высокую квалификацию в области применения CAD-CAE-технологий.

Сейчас этот вид научкоемкого бизнеса – глобальный аутсорсинг (Global OutSourcing) инженерных услуг – находится на начальном этапе своего развития. В настоящее время сегмент мирового рынка аутсорсинга, который наиболее привлекателен для российских специалистов, все дальше уходит от дешевого и примитивного кодирования в сторону аутсорсинга сложных инженерных и технологических решений и услуг. Именно это

направление аутсорсинга, несмотря на значительные сложности при его реализации, особенно интересно для России. Достаточно очевидно, что аутсорсинг инженерных услуг будет очень интенсивно развиваться в ближайшие годы, а у российских специалистов появляется уникальная возможность, выполняя заказы ведущих мировых промышленных фирм, участвовать в международном разделении труда с собственными разработками и многочисленными Know-How в области применения научноемких компьютерных технологий, в первую очередь, CAD- и CAE-систем. Подчеркнем, что для выполнения большинства таких CAD-CAE-контрактов в рамках GlobalOutSourcing-деятельности необходимо использовать именно те CAD-CAE-системы, которые используют и заказчики.

Представители ведущих отраслей промышленности, таких как авиастроение, автомобилестроение, энерго- и электромашинострое-  
ние, судостроение и электроника, работают в условиях жесткой конкуренции. Критически важными факторами успеха являются выпуск усовершенствованной продукции на рынок в кратчайшие сроки и постоянные инновации, в частности, связанные с внедрением PLM-технологий, при максимальном сокращении издержек на проектирование и производство. Добиться снижения издержек при сосредоточении всех интеллектуальных ресурсов фирмы в одном месте и при высоких уровнях оплаты труда персонала достаточно сложно, что и является стимулом к развитию аутсорсинга инженерных работ.

По данным аналитической компании AMR Research, инженерный аутсорсинг составляет пока незначительную, но быстро растущую часть мирового рынка таких услуг. Среди производственных фирм, принявших участие в опросе AMR, 15% передали на аутсорсинг часть своей исследовательской деятельности и инженерных работ, а 10% планировали сделать это до конца 2005 года.

Итак, работа в условиях глобализации и жесткой конкуренции требует регулярного и эффективного взаимодействия между многочисленными участниками процесса проектирования и производства, которые к тому же могут находиться в совершенно разных точках земного шара. Следовательно, без применения PLM-технологий, позволяющих организовать командную работу над изделием на протяжении всего его жизненного цикла, обойтись практически невозможно, что, в свою очередь, подталкивает средние и малые предприятия, участвующие в GlobalOutSourcing-деятельности, также переходить на PLM-технологии. Иначе им не удастся эффективно организовать сотрудничество с зарубежными партнерами по бизнесу. В результате CAD- и CAE-системы, представляющие собой центральную часть PLM-технологий, превращаются из индивидуального инструмента в эффективные средства командной работы.

Отметим некоторые основные тенденции развития CAD/CAM-систем, которые в последние годы усилиями тысяч разработчиков превратились в мощные и надежные системы, автоматизирующие выполнение практически всех распространенных операций проектирования и технологической подготовки к производству. Для последних версий наиболее распространенных CAD-CAM-систем характерен ряд общих моментов их эволюционного развития:

– пользовательский интерфейс CAD-систем всех уровней с каждой версией становится удобнее;

– CAD-системы среднего класса все более тесно интегрируются с CAM- и PDM-системами и содержат некоторые элементы CAE-систем, что позволяет конструкторам выполнять простейшие инженерные расчеты, не покидая единого пользовательского интерфейса;

– CAD-системы содержат utilitys для обнаружения и исправления наиболее распространенных ошибок данных, возникающих при

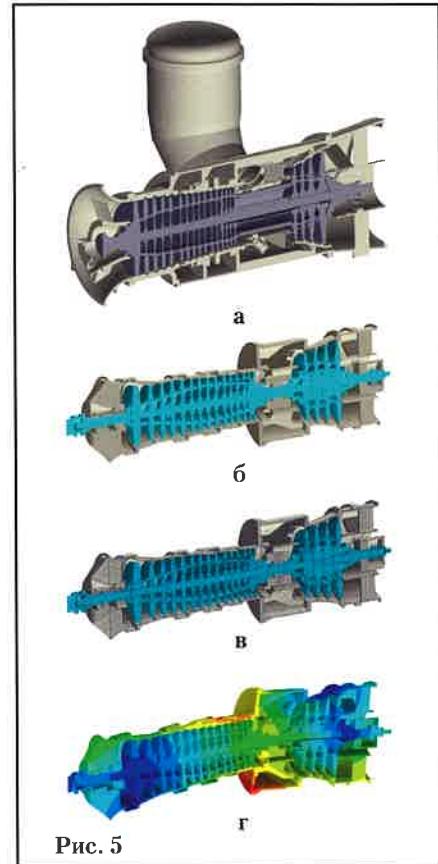


Рис. 5

передаче моделей из одной системы в другую;

– CAD-системы для твердотельного моделирования среднего класса теперь включают средства моделирования поверхностей сложной формы, что необходимо при работе с изделиями из листового металла;

– CAD-модели становятся все более фотoreалистичными.

Другим «локомотивом» PLM-рынка, наряду с глобальным аутсорсингом, за последние два года стали программные системы, предназначенные для выполнения инженерного анализа – CAE-системы (напомним, что аббревиатура CAE порождена словосочетанием Computer-Aided Engineering). В настоящее время в CAE-сегменте PLM-рынка наблюдается настоящий бум: по данным аналитической компании Daratech, в 2004 году объем продаж CAE-систем в целом вырос на 12% по сравнению с 2003 годом и превысил знаменательный рубеж – \$2 млрд. В ноябре 2004 года компания Daratech опубликовала данные исследований,

свидетельствующие, что доля рынка САЕ-систем достигла 25% от объема всего PLM-рынка. Большинство разработчиков САЕ-систем подтвердило большие объемы продаж и в только что закончившемся 2005 году. Причем принципиально важно отметить, что по прогнозам экспертов объемы продаж CAD-систем в дальнейшем будут неуклонно снижаться, так как мировой рынок CAD-систем близок к насыщению, а рынок научноемких САЕ-технологий в ближайшие годы будет расти наивысшими темпами.

Ежегодный прирост рынка САЕ-систем оценивается примерно в 13,5% (что выше темпов роста PLM-рынка в целом) и к 2014 году составит около \$8 млрд. (для сравнения – в 2002 году крупнейшие поставщики PLM-систем имели общий доход \$5,65 млрд.).

Отметим главные причины возросшего интереса к САЕ-системам:

- стремительное и регулярное увеличение вычислительной мощности компьютеров за последние 25 лет;

- значительное расширение спектра функциональных возможностей САЕ-систем, позволяющих на основе рациональных математических/механических/конечно-элементных моделей, обладающих высоким уровнем адекватности реальным объектам и процессам, чрезвычайно быстро выполнять компьютерное моделирование и получать достоверные результаты – об этом раньше приходилось только мечтать;

- признание ведущей роли САЕ-моделирования для ускорения выпуска новой конкурентоспособной продукции, повышения качества продукции и снижения финансовых и временных затрат на разработку новых образцов.

Итак, с Hardware все понятно – ни одно техническое достижение не умножило так возможности человека, как создание и стремительное развитие компьютеров, которые увеличили в миллиарды раз скорость выполнения

арифметических и логических операций, что позволило принципиально изменить характер и существенно повысить производительность интеллектуального труда. По существу мы являемся свидетелями и участниками «компьютерной революции», подобно той промышленной революции XVIII века, которая явила результатом изобретения паровой машины и сопровождалась колossalным повышением производительности физического труда. Американские эксперты приводят такое яркое сравнение: «Если бы за последние 25 лет авиационная промышленность развивалась бы столь же стремительно, как и вычислительная техника, то Boeing 767 можно было бы сегодня приобрести за \$500 и облететь на нем земной шар за 20 минут, израсходовав при этом 19 литров горючего».

Итак, в соответствии с законом Мура стоимость высокопроизводительных компьютеров, необходимых для инженерных расчетов, значительно снизилась. В результате САЕ-системы, которые раньше работали исключительно на суперкомпьютерах и мощных специализированных рабочих станциях, теперь могут эффективно функционировать на мощных персональных компьютерах. Если раньше для полномасштабного моделирования требовались суперкомпьютеры, то сегодня для тех же расчетов достаточно кластера из рабочих станций, стоимость которого значительно меньше затрат на суперкомпьютер. Чрезвычайно перспективным представляется вариант специально организованной среды распределенных высокопроизводительных вычислений (Distributed High-Performance Computing, DHPC) на базе гетерогенной локальной сети, состоящей из мощных персональных компьютеров, что требует еще меньше финансовых затрат, особенно в части, называемой «стоимость владения и обновления».

Необходимо отметить, что в течение длительного времени специалисты, работающие в промышленности, скептически

относились к возможностям САЕ-систем, считая результаты натурных экспериментов более точными и надежными, чем результаты компьютерного моделирования. И для этого были все основания. Так, в книге акад. О.М. Белоцерковского и его учеников [8] приведены такие сведения: «... фирмой «Боинг» был проведен тщательный анализ результатов примерно 700 расчетных работ, проведенных на ЭВМ в 70-80 годах прошлого столетия; оказалось, что 70% конечных результатов расчетов были неверными и причиной тому явилось использование неадекватных математических моделей». Добавим, что, по-видимому, более правильно говорить об ограниченных возможностях компьютерного моделирования, имевшихся в то время, и о не соответствии этих возможностей уровню сложности предлагаемых для решения задач. Ясно, что такое положение вещей лишь могло увеличивать долю скепсиса в оценке возможностей компьютерного моделирования того времени.

Однако в настоящее время отношение к численным результатам начинает кардинально меняться. Это связано с тем, что в последние годы специалисты ведущих мировых промышленных компаний приобрели положительный опыт реализации сложных проектов, обязанных своим успехом, в первую очередь, применению именно САЕ-технологий. Кроме того, САЕ-системы с каждым годом становятся удобнее и нагляднее в применении, обладая при этом широким спектром возможностей визуализации результатов численных расчетов, достаточно упомянуть компьютерные анимации сложных нестационарных процессов. Компьютерное моделирование в настоящее время можно и весьма желательно использовать совместно с натурными экспериментами как для верификации получаемых численных результатов, так и для идентификации параметров математических моделей, «тонкой» настройки математических, механических и компьютерных моделей с целью

повышения уровня адекватности разработанных моделей реальным объектам и/или процессам, что ведет к повышению точности результатов компьютерного моделирования.

Так как развитие компьютерного моделирования и непрерывное совершенствование функционального наполнения САЕ-систем происходит на благоприятном фоне снижения стоимости и повышения доступности высокопроизводительных компьютеров, то эти взаимовлияющие процессы неминуемо сопровождаются все более широким и интенсивным внедрением САЕ-систем в практику инженерных расчетов. Более того, расчеты, длительность которых ранее составляла несколько дней или недель, теперь выполняются за несколько часов. Это означает, что ежегодно, с каждой новой версией САЕ-систем, возможности инженеров по решению сложных задач механики конструкций, особенно нестационарных нелинейных пространственных задач, задач механики жидкости и газа (Computational Fluid Dynamics, CFD), связанных задач механики деформируемого твердого тела (т.н. «Multiphysics Problems»), возрастают и расширяются, т.е. «те задачи, о решении которых всего пару лет назад инженеры лишь мечтали, сейчас можно формулировать и решать, более того, получать численные решения с высокой степенью точности».

По мнению экспертов, рынок САЕ-систем может расти даже более высокими темпами, чем 12% в год, так как возможности научноемких САЕ-технологий далеко выходят за рамки простого повышения производительности труда конструкторов, как это было в свое время в связи с широким внедрением CAD-систем (вспомним, что 35 лет назад Национальный научный фонд США назвал появление CAD-систем самым выдающимся событием с точки зрения повышения производительности труда со времен изобретения электричества).

Принципиально важно понимать, что САЕ-технологии

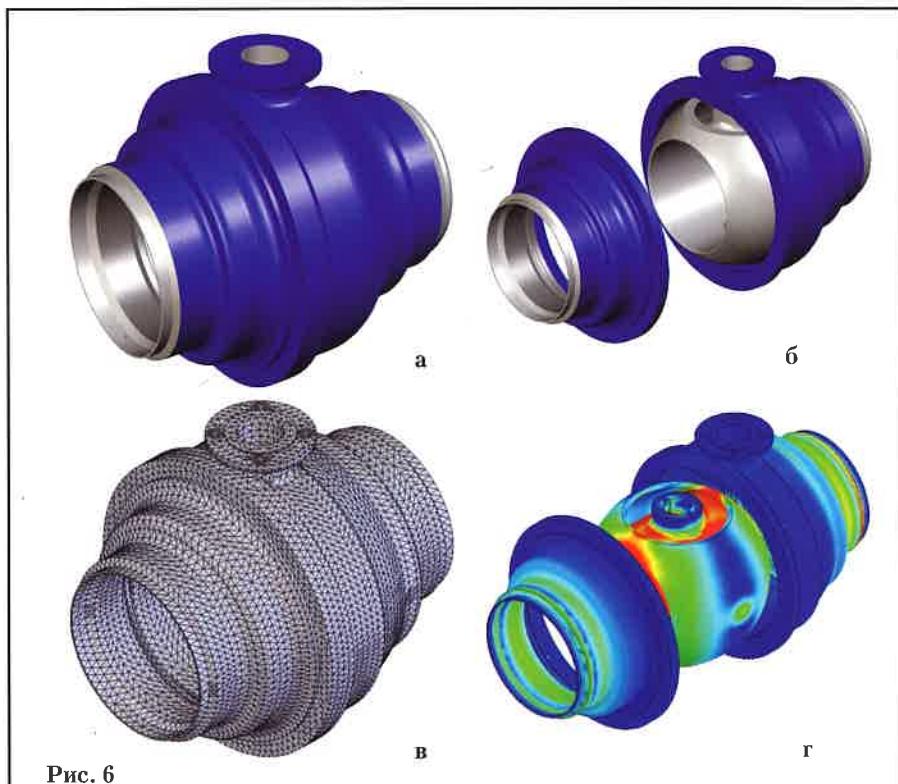


Рис. 6

позволяют обоснованно выбирать запасы прочности при снижении материалоемкости конструкций и машин, ускорить создание и выпуск конкурентоспособных изделий в продажу, значительно снизить затраты на гарантийное обслуживание и, что самое главное, разрабатывать и производить в кратчайшие сроки изделия более высокого качества, которые более долговечны. Естественно, что в настоящее время ведущие мировые промышленные предприятия считают тотальное внедрение САЕ-технологий одной из наиболее актуальных задач.

Эксперты из аналитической компании Daratech уверены, что смена отношения к внедрению и применению САЕ-систем произойдет в ближайшем будущем.

Обратимся к примерам эффективного использования концепций и технологий глобального аутсорсинга и компьютерного инжиниринга. В 1987 году на кафедре «Механика и процессы управления» (зав. каф. – Заслуженный деятель науки РФ, профессор, д. ф.-м. н. В. А. Пальцов) физико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического

университета по инициативе автора статьи была организована первая в России учебно-научно-инновационная лаборатория «Вычислительная механика» (CompMechLab, [www.FEA.ru](http://www.FEA.ru)). В настоящее время сотрудники CompMechLab, имеющие сертификаты и дипломы ведущих мировых фирм-разработчиков CAD/CAM и САЕ систем (ANSYS Inc., Livermore Software Technology Corporation (LSTC), Parametric Technology Corporation (PTC), SolidWorks Corp. и Autodesk) обладают уникальным для России опытом применения научно-исследовательских компьютерных технологий – CAD/CAE-технологий – систем компьютерного проектирования и инжиниринга: Unigraphics NX/SolidEdge/Femap/NX Nastran, CATIA/SolidWorks/CosmosWorks/CosmosFloWorks/ABAQUS (ныне Simulia), ANSYS/Multiphysics/Parallel Performance & ANSYS/LS-DYNA, ANSYS/CFX/Parallel Computing, LS-DYNA SMP/MPP, MSC.Software (Patran/ADAMS/Nastran/Marc), NEiSoftware (NEiNastran/NEiWorks/Femap), PRO/Engineer, Autodesk Inventor, MicroFE, FlowVision – в образовании, научных исследованиях,

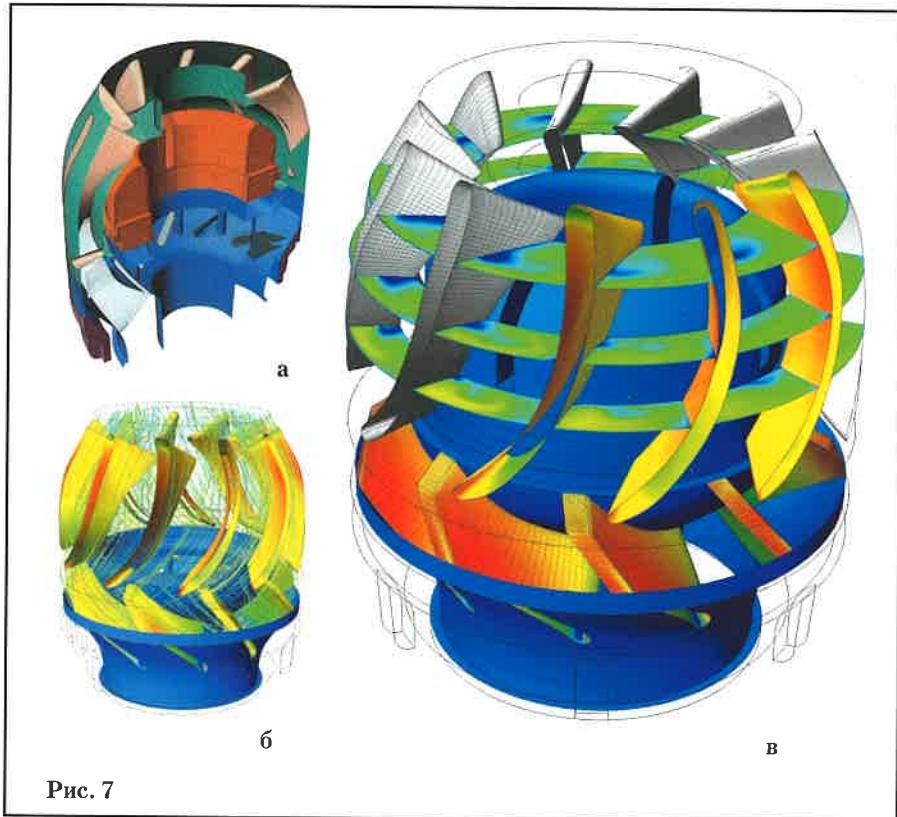


Рис. 7

а также в отечественной и мировой промышленности.

Достаточно упомянуть многолетний положительный опыт выполнения сотрудниками CompMechLab многочисленных GlobalOutSourcing-контрактов в областях механики деформируемого твердого тела, механики конструкций, машин, композитных структур, сооружений, установок, приборов, макро/мезо/микро/наномеханики, аэрогидродинамики, технологической механики, вычислительной механики, компьютерного инжиниринга по заказам ведущих мировых промышленных компаний – Boeing, General Electric Power Systems, General Electric Oil and Gas, General Motors, Ford Motor Company, Caterpillar, Schlumberger, Ferrari, Renault, BARD, AM General, Transportation Design and Mfg., Siemens, Volkswagen, Westfalia, Solid Works Corp., Parametric Technology Corp., Japan Industrial Technology Association, Japan New Energy and Industrial Technology Development Organization, LG Electronics, China Nuclear Power Corporation, Institute

of Plasma Physics, а также других высокотехнологичных фирм.

Статья проиллюстрирована результатами некоторых проектов, выполненных сотрудниками CompMechLab с помощью высокопроизводительного комплекса FEA/CFD/CAE-DHPC-Cluster на основе CompMechLab-концепции распределенных конечно-элементных вычислений на множестве проблемно-масштабируемых «нестационарных» кластеров ( $N_{proc} = 2, \dots, 8, \dots, 12$ ), каждый из которых генерируется под определенную задачу «точно вовремя» («just-in-time»), а в остальное время компьютеры используются как мощные рабочие станции.

На Рис. 1(а, б) представлены пространственные (3D) CAD-модели основного конструкционного элемента задней подвески автомобиля представительского класса одного из мировых лидеров автомобильной промышленности. Целью конечно-элементных (КЭ) исследований является изучение вопроса о замене традиционного технологического процесса изготовления данного элемента (с помощью сварки из стали) на современный

способ изготовления – с помощью литья из алюминия при уменьшении общего веса конструкционного элемента и удовлетворении требованиям прочности и жесткости. На Рис. 1(в, г) представлена 3D конечно-элементная (КЭ) модель, которая содержит 1 036 048 степеней свободы (NDF). На Рис. 2 приведены поля интенсивности напряжений по Мизесу для первоначального варианта (Рис. 2(а)) конструкции и для двух модифицированных вариантов (Рис. 2(б, в)). Анализируя представленные рисунки, можно заметить, что в процессе оптимизации конструкции (изменение радиусов закруглений, увеличение толщин и установка дополнительных ребер в зонах концентрации напряжений и др.) удалось значительно снизить напряжения.

На Рис. 3(а) показана 3D CAD-модель переднего силового бампера одного из новейших автомобилей-внедорожников. Цель расчетов – многовариантное КЭ исследование 3D напряженного состояния силового бампера и оценка работоспособности нового конструкционного варианта при заданных специфических условиях статического нагружения, сохранении требуемой жесткости и уменьшении общей массы.

На Рис. 3(б) изображен фрагмент КЭ модели бампера, которая содержит 540 810 степеней свободы. На Рис. 3(в, г) приведены поля интенсивности напряжений по Мизесу для передней и задней поверхностей бампера соответственно. Установлено, что в местах крепления фаркопа к несущей балке и местах крепления несущей балки к кузовным элементам возникают зоны концентрации напряжений, которые удалось значительно снизить в процессе дальнейшей рациональной оптимизации конструкции.

Одно из основных требований, предъявляемое к трейлерам – экономичность – умеренное потребление топлива. При этом важными факторами, оказывающими влияние на данный показатель, являются характеристики обтекаемости

трейлера набегающим воздушным потоком, в первую очередь, коэффициент лобового сопротивления. Для выполнения многовариантного CFD-анализа разработана серия 3D КЭ моделей, каждая из которых содержит около 5 млн. ячеек. На Рис. 4(а, б) приведены распределение давления по внешним поверхностям 3D модели трейлера и линии тока, возникающие при обтекании движущегося трейлера набегающим воздушным потоком. Рис. 4(б) иллюстрирует наложение линий тока воздушного потока на изображение одного из легендарных трейлеров. В результате выполненных CFD-расчетов предложена новая конструкция вихревогенераторов и определены зоны их установки, которые позволяют снизить лобовое сопротивление грузового трейлера набегающему воздушному потоку и, соответственно, уменьшить затраты на топливо.

На Рис. 5(а) представлена 3D CAD-модель газотурбинной установки, которая содержит ротор, расположенный внутри корпусов компрессора, камеры сгорания и турбины, и учитывает основные особенности конструкции – горизонтальные и вертикальные фланцевые соединения. 3D CAD-модель газотурбинной установки предназначена для КЭ исследования 3D стационарных и нестационарных полей температур, 3D напряженно-деформированного состояния с учетом контактного взаимодействия во фланцевых соединениях и вибрационного анализа.

На Рис. 5(б, в) приведены 3D CAD-модель и 3D КЭ модель (210 312 степеней свободы) турбокомпрессора газотурбинной установки, предназначенные для исследования собственных частот и форм свободных колебаний. На Рис. 5(г) представлена одна из форм свободных колебаний турбокомпрессора газотурбинной установки.

На Рис. 6(а) представлена 3D CAD-модель полнопроходного шарового крана Ду300, являющегося одним из основных узлов разветвленной сети трубопроводов подачи воды, нефти и текучих химических

продуктов. На Рис. 6(б) серым цветом показано поворотное запорное устройство – шар. Одной из важных проблем проектирования современной запорной арматуры является снижение веса при удовлетворении критериям прочности. Выполненные многовариантные КЭ исследования 3D напряженно-деформированного состояния конструкции позволили определить области низких напряжений и обеспечить значительное снижение общей массы с необходимым коэффициентом запаса. На Рис. 6(в) представлена типичная 3D КЭ модель, на Рис. 6(г) – типичное распределение интенсивности напряжений по Мизесу в основных деталях (штуцер, шар, корпус) шарового крана.

На Рис. 7(а) представлен разрез 3D КЭ модели типичной ступени центробежного погружного насоса, применяемого для добычи нефти. Основными элементами ступени, которая используется в CFD-анализе, являются: рабочее колесо (синий цвет, лопати – голубой цвет), диффузор, выравнивающий поток (зеленый цвет, лопатки – коричневый цвет) и две дополнительные полости (красный и фиолетовый цвета) для уравновешивания системы. Разработанная 3D КЭ модель проточной части ступени содержит около 2 млн. КЭ, что при пересчете на количество решаемых уравнений соответствует 12 млн. уравнений. На Рис. 7(б) представлены типичные распределения статического давления по лопаткам, как рабочего колеса, так и диффузора, а также распределения скоростей по сечениям проточной части диффузора. На Рис. 7(в) показано расположение линий тока между лопастями рабочего колеса и диффузора, а также распределение давления по лопаткам.

## Список источников

[1] Боровков А.И., PLM-технологии, компьютерный инжиниринг, глобальный аутсорсинг. Часть 1. Современное состояние, тенденции и перспективы развития // Конструктор. Машиностроитель, Декабрь, 2005., с. 4-7.

[2] Боровков А.И., Пальмов В.А., Рудской А.И., Генерация знаний, развитие и коммерциализация научно-технических компьютерных технологий в рамках глобальных тенденций и приоритетных направлений развития науки и техники // Материалы IX Всероссийской конф. по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования в технических университетах», СПб.: Изд. СПбГПУ, 2005, с. 9-18.

[3] Боровков А.И., Пальмов В.А., Высокие интеллектуальные технологии компьютерного инжиниринга в образовании, науке и промышленности // Материалы XI Межд. научно-метод. конф. «Высокие интеллектуальные технологии и качество образования и науки», СПб.: Изд. СПбГПУ, 2004, с. 33-48.

[4] Боровков А.И., Конечно-элементная механика и компьютерный инжиниринг. Опыт применения научно-технических компьютерных технологий в образовании, научных исследованиях и промышленности // Материалы межвуз. конф. «Практика применения научного программного обеспечения в образовании и научных исследованиях», СПб.: Изд. СПбГПУ, 2003, с. 24-33.

[5] Материалы интернет-сайтов:  
<http://www.amrresearch.com/>  
<http://www.arcweb.com/>  
<http://www.cimdata.com/>  
<http://www.daratech.com/>  
<http://www.idc.com/>  
<http://www.gartner.com/>

[6] Данные еженедельника PCWeek: <http://www.pcweek.ru>

[7] Информация сайта журнала CAD/CAM/CAE Observer :  
<http://www.cadcamcae.lv>

[8] Белоцерковский О.М., Опарин А.М., Чечеткин В.М., Турбулентность: новые подходы. – М.: Наука, 2002.