

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МАШИНОСТРОЕНИИ

С.В. Медведев, А.М. Криштофик

## Введение

Буквально во всех отраслях промышленности от авиационно-космической до производства бытовой техники наблюдается устойчивая тенденция расширения возможностей и повышения функциональных характеристик разрабатываемых изделий, в том числе за счет их усложнения. Это естественное следствие конкурентной борьбы за потребителя. Понятно, что чем сложнее изделие и чем шире его возможности, тем больше времени и средств необходимо на его разработку, испытания, доводку до требуемой надежности, тем дороже выполнение гарантийных обязательств. В то же время конкурентная борьба вынуждает предприятия при производстве новых изделий всемерно сокращать длительность цикла “разработка – испытания – доводка – запуск в производство”, что может привести к выпуску неконкурентоспособного изделия и/или чрезмерно повысить стоимость комплекса работ по выводу на рынок новой продукции.

## Виртуальное проектирование и компьютерное моделирование

Важнейшим научно-практическим результатом применения технологии суперкомпьютеров стало появление самостоятельного направления развития науки и техники — высокоточной виртуальной трехмерной визуализации объектов и процессов на основе их математического моделирования. Целый ряд сложнейших физических и химических процессов, связанных с высокой температурой, радиоактивностью, нестабильностью, агрессивностью вещества сегодня воспроизводится в виртуальных лабораториях без натуральных экспериментов, побочных эффектов и риска для жизни окружающих. Человек проникает в тайны материального мира, живых организмов, проектирует новые материалы, образцы техники и испытывает их с помощью суперкомпьютеров. В связи с этим одной из наиболее заметных и важных тенденций развития промышленности развитых стран является применение методов компьютерного моделирования с использованием средств высокопроизводительной обработки данных (суперкомпьютеров). Это предоставляет широкие возможности не только для совершения научных открытий в таких областях знаний как нанотехнологии, астрофизика, биотехнологии и другие, но и в решении прикладных задач промышленных предприятий в таких отраслях, как машиностроение (авиастроение, судостроение, автомобилестроение и тракторостроение), радиоэлектронная, атомная, ракетно-космическая промышленность, а также ОПК, атомная энергетика, металлургия. Так, виртуальное проектирование и моделирование испытаний виртуальных прототипов в машиностроении принципиально увеличивают прибыли компаний за счет сокращения цикла проектирования, числа прототипов и, как следствие, высвобождения значительных финансовых ресурсов. Применение методов компьютерного моделирования дает возможность создавать улучшенные конструкции, снижая при этом стоимость разработки, время выхода продукции на рынок, повышая безопасность, технологичность и эксплуатационные качества продукции при снижении ее материалоемкости. В современных условиях, учитывая повышение сложности проектов и увеличение степени их технологического риска, без применения технологий высокопроизводительных вычислений компании, разрабатывающие и производящие авиационную технику и РКТ, резко сократят долю своей продукции или же вынуждены будут уйти с мирового рынка. Проектирование коммерческих судов и особенно морской военной техники также требует интенсивных вычислений. СК позволяют разработчикам рассмотреть множество вариантов конструкции судна (систем, устройств, механизмов) с различных точек зрения (эксплуатационные характеристики, эргономичность, технологичность, надёжность, безопасность и т.д.) и выбрать оптимальный вариант в сжатые сроки, что невозможно осуществить с использованием классических методик расчётов.

Наиболее ресурсоемкие и важные задачи микроэлектроники связаны с разработкой новых материалов. Поскольку миниатюризация электронных компонентов уже достигается с использованием свойств материалов на наноуровне, то применение методов компьютерного моделирования для разработки указанных технологий при этом часто является единственным возможным путем для достижения положительного результата.

В области проектирования автомобильной техники наиболее актуальными задачами являются расчеты на прочность с оптимизацией по массе и долговечности (ресурсу), а также расчеты внешней и внутренней аэродинамики автомобиля, включая системы кондиционирования и теплообмена в кабине водителя. Ужесточающиеся требования по шуму и внедрение шумоизолирующих экранов в конструкцию автомобиля породили проблему совместного решения задач акустики и теплообмена в подкапотном пространстве. Переход на стандарты Евро-3 и -4, а в перспективе Евро-5 и -6, требуют численного моделирования рабочего процесса двигателей автомобильной техники с использованием не только законов газовой динамики, но и фазовых превращений.

Применяемое для решения задач предприятий ОПК, компьютерное моделирование позволяет

совершенствовать системы вооружений, сокращать период разработки и испытаний за счет замены значительной части натуральных экспериментов численными, увеличивать точность, обеспечивать надежность и качество систем вооружений, более рационально использовать материалы, сокращать расходы на подготовку и повышать отдачу от работы персонала. Практически любое предприятие или конструкторское бюро, связанное с выпуском или проектированием систем вооружений, нуждается в средствах анализа газодинамических явлений. Применение методов моделирования позволяет решить сложные технические проблемы и сэкономить значительные средства.

Учитывая повышение сложности проектов и увеличение степени их технологического риска, в современных условиях предприятия, разрабатывающие и производящие высокотехнологичную наукоёмкую промышленную продукцию без применения технологий высокопроизводительных вычислений, резко сократят долю своей продукции или же вынуждены будут уйти с мирового рынка в силу потери конкурентоспособности. При отсутствии доступа к суперкомпьютерным технологиям из 33 высокотехнологических компаний США (по мнению Совета по конкурентоспособности экономики Соединенных Штатов, [www.compete.org/images/uploads/.../NII\\_Innovate\\_America.pdf](http://www.compete.org/images/uploads/.../NII_Innovate_America.pdf)) 97 процентов потеряли бы свою долю мирового рынка и только 3 процента продолжили бы существовать.

Суперкомпьютерные технологии стали действительно частью производительной силы и в отраслях промышленности, где разработка новой и совершенствование существующей продукции требует проведения большого количества расчетов, незаменимым инструментом является использование высокопроизводительных вычислительных систем.

Таким образом, применение методов компьютерного моделирования и виртуального прототипирования с использованием высокопроизводительных вычислительных систем для решения практических задач промышленных предприятий позволяет сократить сроки разработки новых продуктов, снизить стоимость разработки и испытаний и улучшить качество продукции. Использование методов численного моделирования и суперкомпьютерных вычислений является ключевым фактором конкурентоспособности разработок и обеспечивает эффективную поддержку в создании инновационных решений в высокотехнологичных и наукоёмких отраслях промышленности.

### **Использование суперкомпьютерных технологий в машиностроении Республики Беларусь**

В настоящее время происходит изменение взглядов промышленных предприятий на вопросы использования суперкомпьютерных технологий. Так, Минский завод колесных тягачей и Минский моторный завод при разработке новой продукции упор делают на использование суперкомпьютерного моделирования и виртуальных испытаний для сокращения сроков разработки с 10 до 3,5 - 4 лет и соответственно удешевления этапа разработки. Традиционные сроки разработки сложной автомобильной техники, например продукция МЗКТ, составляет 10 -15 лет. В современных условиях рыночной экономики вновь разработанная продукция оказывается не конкурентоспособной, что приводит к необходимости сроков разработки в 3-5 раз (по оценкам главного конструктора МЗКТ).

Приведем некоторые примеры использования суперкомпьютерных технологий на этих предприятиях в рамках выполнения заданий программы «СКИФ-ГРИД».

Для Минского моторного завода разработана и передана для использования новая технология определения параметров систем впускного и выпускного тракта дизельных двигателей методом их виртуальных испытаний в грид-системе «СКИФ». Разработанная технология позволяет определить: значения крутящего момента в рабочих цилиндрах головки дизельного двигателя при различных ходах клапана; значения расхода воздуха в рабочих цилиндрах головки дизельного двигателя при различных ходах клапана; распределение линий тока воздуха в рабочем цилиндре головки дизельного двигателя и поля распределения температуры отработанных газов в различных сечениях охладителя системы выпускного тракта; значение расхода воздуха через клапан системы регенерации отработавших газов; изображения потоков при смешивании надувочного и отработанного газа; распределение полей давления в рабочем цилиндре с учетом законов движения клапанов и поршня и полей скоростей воздуха в рабочем цилиндре с учетом законов движения клапанов и поршня (примеры рис. 1,2).

Главная черта разработанной технологии состоит в том, что кроме традиционных трех этапов решения инженерных задач (подготовки исходной расчетной модели, выполнения расчета и анализа результатов расчета) в технологию включен этап верификации используемой математической модели и методики расчета с помощью данных натуральных испытаний. После достижения соответствия данных расчетов в грид-системе и соответствующих натуральных испытаний проводятся испытания для других вариантов изделия при тех же параметрах граничных условий.



Рис. 1 Графики зависимости расхода воздуха от хода клапана

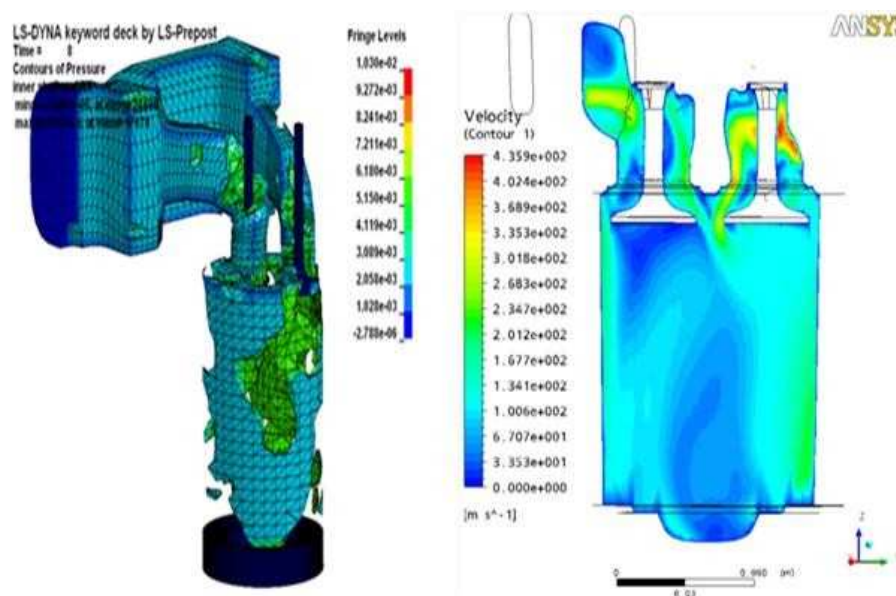


Рис. 2. Распределение полей давления в рабочем цилиндре полей скоростей воздуха в рабочем цилиндре с учетом законов движения клапанов и поршня

При этом проведены: исследование влияния турбокомпрессора на форму потоков газа, поступающего на вход в головку двигателя путем моделирования в грид-системе «СКИФ», определено, что турбулентность потоков, присутствующая на выходе из компрессора, гасится системой охлаждения надвучного воздуха, что позволило обеспечить учет турбокомпрессора в расчетной модели впускного тракта путем задания значений замеренных в натурных испытаниях параметров воздушного потока на входе в патрубок головки двигателя. Проведены виртуальные испытания в грид-системе «СКИФ» головки цилиндров 249-1003015 и головки цилиндров 840.1003.014-40 с вариантами работы винтового и тангенциального каналов в отдельности и совместной работе. По результатам виртуальных испытаний вычислены значения крутящего момента на решетке и расхода газа в рабочем цилиндре. Выполнен сравнительный анализ результатов натурных испытаний продувки головок 249-1003015 и 840.1003.014-40, выполненных ОАО «Минский моторный завод», и виртуальных испытаний показал, что расхождение значений результатов моделирования с натурными испытаниями не превышает 20% для крутящего момента (по отклонению между средними линиями расчетных и экспериментальных значений) и 15% для расхода. По результатам исследований проведены виртуальные испытания модифицированной геометрической модели головки двигателя 840.1003.014-40 и выполнено

сравнение показателей для базового и модифицированного вариантов по разработанной технологии. Сложность расчетов составила 2536 ядер x часов.

Использование суперкомпьютерных технологий для интеграции этапов моделирования, основанных на расчете температурных характеристик при горении, и динамических характеристик на основе моделирования напряженно-деформированного состояния при заданных исходных данных: законах движения или внешних нагрузках, с использованием моделей перехода от процессов интенсивного горения к детонации на уровне постановки связанных задач при разработке новой линейки двигателей дизельных двигателей мощностью 1 000 – 1300 л.с. и шестицилиндровых двигателей мощностью от 185 до 500 л.с., отвечающих требованиям Euro-4, Euro-5, Stage 3B, при выпуске и реализации в объеме 1700 штук в уровнях цен 2010 года это составляет 28 390 млн.рублей.

Подключены рабочие места конструкторов расчетчиков в грид-среду с установкой программного обеспечения для выполнения расчетов в грид-приложениях, установленных в грид-системе «СКИФ» и анализа их результатов (клиентское ПО UNICORE, включая клиент командной строки – UNICORE Commandline Client (UCC), графический клиент – Rich Client, файловый менеджер UNICORE File Manager (UFM), программа WinSCP для работы в удаленном доступе на вычислительных ресурсах грид-сети; программа Xming для работы в графическом режиме с программным обеспечением ANSYS, установленным в грид-сети; программа Ls-Prepost3.0).

Результаты определения параметров впускного и выпускного тракта методом виртуальных испытаний в грид-системе «СКИФ» приняты ОАО «Минский моторный завод» согласно акту приемки от 17 июня 2010 года.

Для ОАО «МЗКТ» разработана и передана в опытную эксплуатацию система проектирования, испытаний и оптимизации (доводки) машиностроительных изделий. В рамках этих работ разработана методика моделирования и доводки элементов конструкции автомобиля МЗКТ 6001 путем моделирования их вибрационных и прочностных свойств, проведены виртуальные прочностные испытания каркаса кабины автомобиля МЗКТ 6001 с использованием пакета LS-DYNA при различных типах нагрузений, виртуальные испытания для определения значений физических параметров (коэффициентов жесткости, сопротивления, демпфирования, собственных частот, амплитуд и фаз) элементов конструкции автомобиля МЗКТ 6001 в среде пакета ADAMS (рис. 3), виртуальные испытания комплектной модели автомобиля МЗКТ 6001 (рис. 4). Сложность расчетов составила 1871 ядер x 3 час.

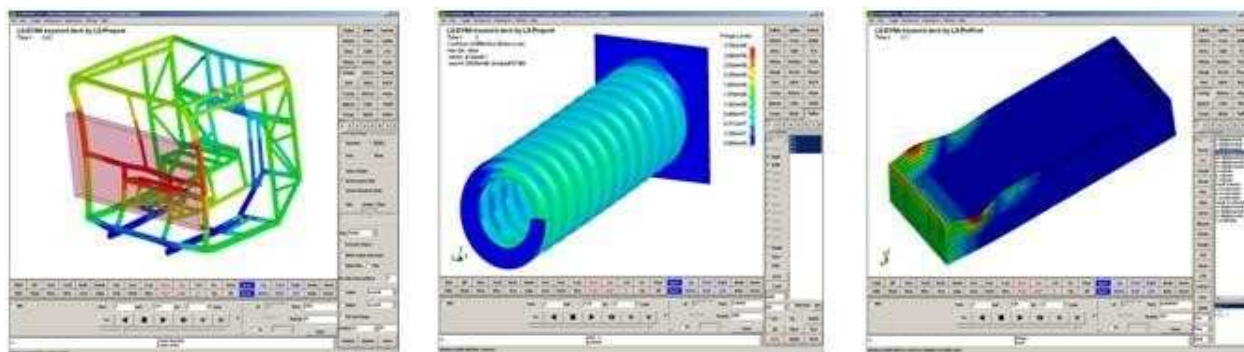
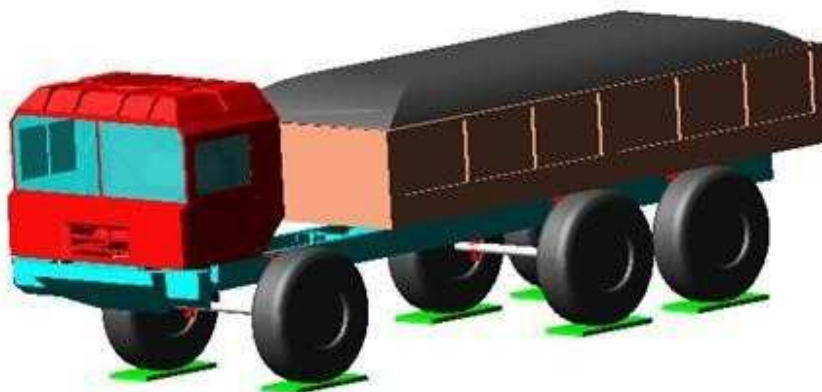


Рис. 3 Виртуальные испытания элементов конструкции автомобиля МЗКТ 6001 в инженерном грид-сегменте



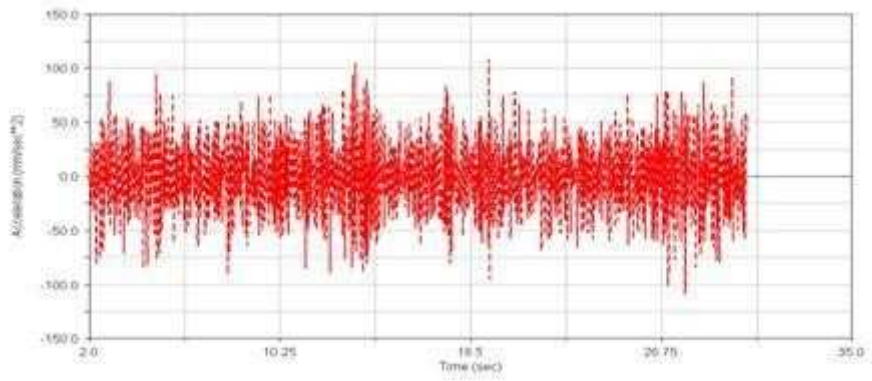
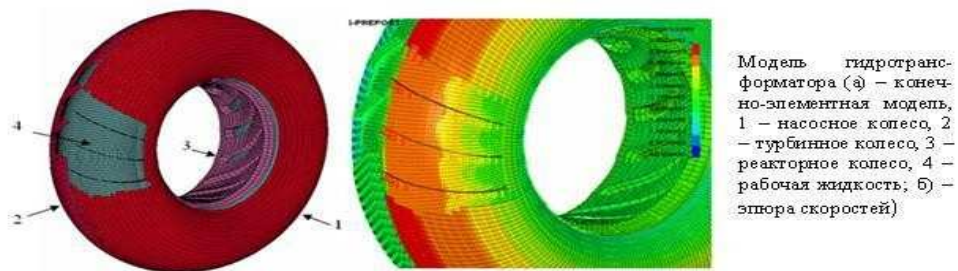


Рис. 4 Виртуальные испытания комплектной модели автомобиля МЗКТ 6001

Для изучения физических процессов и технологий работы при освоении промышленного производства собственных гидротрансформаторов для ОАО «МЗКТ» осуществлялось моделирование и виртуальные испытания изделия (рис. 5, 6).



Модель гидротрансформатора (а) – конечно-элементная модель, 1 – насосное колесо, 2 – турбинное колесо, 3 – реакторное колесо, 4 – рабочая жидкость; б) – эпюра скоростей)

Рис. 5 Моделирование работы гидротрансформатора

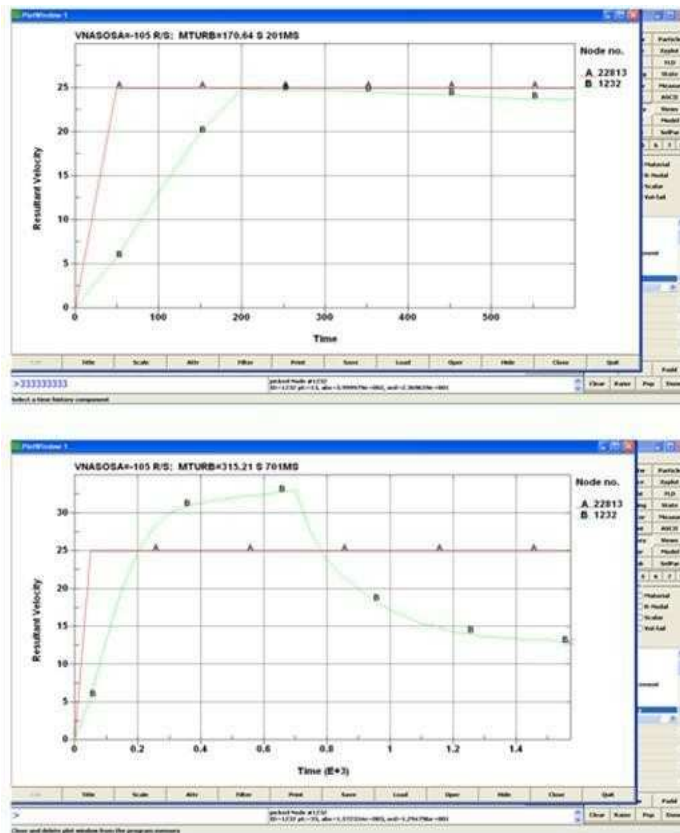


Рис. 6 Верификация по результатам экспериментов (вычислительных и натурных) модели гидротрансформатора

Для этих целей построены конечно-элементные модели основных узлов гидротрансформатора, выбран наиболее эффективный способ моделирования взаимодействия лопастных колес с рабочей жидкостью (метод независимых переменных Лагранжа-Эйлера), а также уравнение состояния, описывающее связь между термодинамическими параметрами системы (уравнение Грюнайзена).

Предварительная оценка эффективности внедрения высокопроизводительных вычислений в ОАО «МЗКТ» приведена в таблице 1.

Таблица 1. Эффективность внедрения высокопроизводительных вычислений в ОАО «МЗКТ»

ОАО «МЗКТ»	Время создания, лет	Число опытных образцов	Затраты на опытные образцы, \$ (Зависит от модели)*
Старые модели	14	01.10.15	6 – 9 млн.
Новые модели	2-3	03.05.11	600 тыс. – 1,5 млн
Сокращение	6,5	3	6
Ресурсы	Расчет конструкции автомобиля занимает 3 месяца на 100 процессорах (1,5 – 2,0 Терафлопс)		
	Проведение виртуальных испытаний прочностных характеристик автомобиля в сборе требует производительности СК около 7 – 10 Терафлопс		
	Многокритериальная оптимизация параметров и характеристик автомобиля на всех режимах работы заняла бы не менее года при использовании суперкомпьютера мощностью 50 Терафлопс		
Имеющиеся ресурсы	Собственные – отсутствуют, обеспечен доступ в грид-сети с подключением 7 рабочих мест конструкторов		

\* По оценочным данным главного конструктора. При этом взяты самые дешевые модели. Для более сложной техники затраты возрастают в 4-7 раз.

С учетом того, что в сроки высвобожденные разработкой осуществляется выпуск и продажа продукции, при серии в 1000 автомобилей в год стоимостью 200 тыс. \$ и коэффициенте прибыльности 0,3 – предприятие получает прибыль в размере 60 млн. \$ в год.

### Заключение

Использование опытного участка грид-сети и созданных суперкомпьютерных установок позволили разработать ряд методик виртуального проектирования изделий машиностроительного профиля, смоделировать отдельные процессы, происходящие на атомных электростанциях, практически реализовать ряд проектов для решения задач с применением грид- и суперкомпьютерных технологий в промышленности, таких как инженерное моделирование и виртуальные испытания в грид-среде.