

# **Отечественные технологии полномасштабных компьютерных испытаний - ключевой фактор устойчивого экономического развития России в XXI веке.**

**Е.П. Велихов В.Б. Бетелин**

## **I. Компьютерные и зачетные испытания**

Природная среда обитания человека, включающая живую и неживую природу, является объектом изучения фундаментальной науки. Основная цель фундаментальной науки - создание возможно более точных предсказательных моделей природных процессов: физических, геологических, климатических, космологических и т.д.

За последние 200 лет на основе достижений фундаментальной науки, являющихся результатом изучения природной среды, сформировалась новая отрасль знаний – технические науки. Основная цель технических наук – создание возможно более точных предсказательных моделей сложных технических систем, не имеющих аналогов в природной среде обитания, и, в конечном счете, создание развития и поддержание технической среды обитания человека.

Сформировавшиеся к 40-м годам 20 века технологии создания сложных технических систем (самолеты, автомобили, двигатели, системы вооружения и т.д.) принципиально основывались на возможности **непосредственного измерения основных параметров функционирования нового изделия**, в процессе стендовых и натурных испытаний как основных инструментах его отработки. Роль инженерных расчетов в рамках этих технологий, в основном, ограничивалось предварительными оценками ключевых параметров нового изделия и уточнением этих параметров на основе результатов стендовых и натурных испытаний.

Однако, существующие технологии оказались непосредственно неприменимы к созданию атомного оружия ввиду принципиальной невозможности непосредственного измерения сверхвысоких скоростей, давлений и температур физических процессов, развивающихся в процессе его функционирования, а также совершенно неудовлетворительной точностью инженерных расчетов. Поэтому в рамках атомных проектов, как СССР, так и США, фактически были заложены основы принципиально новой технологии создания сложных технических систем базирующейся **как на натурных и стендовых, так и в возрастающей степени на компьютерных испытаниях** - расчетных технологиях, обеспечивающих априорное численное предсказание изменения ключевых параметров сложных физических процессов во времени. Обеспечение приемлемой точности таких предсказаний требовало

выполнения огромного объема вычислений и, как следствие, применения самых высокопроизводительных на данный момент ЭВМ, а также создания чрезвычайно больших и сложных программных комплексов моделирования физических процессов. До начала 90<sup>х</sup> годов прошлого века производительность используемых ЭВМ не превосходила **10<sup>8</sup>-10<sup>9</sup> оп/сек**, и в этих условиях все еще требовалось проведение значительных объемов как стендовых, так и натурных испытаний.

Запрет натурных испытаний ядерного оружия, инициировал в конце 90<sup>х</sup> начале 2000<sup>х</sup> годов, разработку принципиально нового поколения технологий создания сложных технических систем, базирующихся на компьютерных испытаниях как на основном инструменте отработки нового изделия. Основная задача стендового оборудования в рамках этих технологий – **проведение зачетных испытаний** подтверждающих достоверность результатов компьютерных испытаний. Создание таких технологий, потребовало, применения ЭВМ производительностью не менее чем **10<sup>12</sup> оп/сек**, а также создания принципиально новых физико-математических моделей, численных методов, расчетных схем и методик.

Владение технологиями **компьютерных и зачетных испытаний** уже в настоящее время является необходимым условием конкурентоспособности страны на высокотехнологичных мировых рынках, поэтому они относятся к категории стратегических и **недоступны на коммерческом рынке**. Именно это обстоятельство определило **технологическое отставание от мировых лидеров** авиационной, автомобильной, космической, энергомашиностроительной и нефтегазовой отраслей России.

Лидерство этих отраслей России на мировых нефтегазовых и высокотехнологичных рынках в 21 веке невозможно без создания отечественных технологий **полномасштабных компьютерных испытаний** (полет самолета на всех режимах и во всех допустимых условиях), предусматривающих **радикальное уменьшение объемов зачетных испытаний**. Создание таких технологий требует применения супер-ЭВМ производительностью 10<sup>18</sup> оп/сек., (Эксафлопс) и, как следствие, разработки отечественных технологий создания таких ЭВМ, новых физико-математических моделей, численных методов, расчетных схем и методик, а также новых технологий создания прикладных программных систем.

Необходимым условием научного лидерства России в 21 веке является создание и использование отечественных эксафлопсных технологий предсказательного моделирования природных процессов, как основного инструмента фундаментальных исследований.

## **II. Состояние дел с технологиями компьютерных испытаний в России**

**II.1. Приоритет развития - аппаратная инфраструктура высокопроизводительных вычислений на основе зарубежных технических решений.**

Технологии компьютерных испытаний на современном этапе развития – это взаимоувязанная триада, включающая:

- собственно высокопроизводительный суперкомпьютер, представляющий собой масштабируемую сеть параллельно работающих коммерческих микропроцессоров, различной архитектуры;
- **прикладное программное обеспечение**, функционирующее в режиме параллельного выполнения на этой масштабируемой сети микропроцессоров;
- **методология использования** высокопроизводительного аппаратно-программного комплекса в промышленности, науке, образовании, экономике.

В России до 2009 года, за исключением атомной отрасли, государственная поддержка развития технологий компьютерных испытаний для промышленности, науки и образования фактически сводилось только к созданию только одной части триады, а именно – суперкомпьютера государство выделяло средства либо на закупку «под ключ» супер-ЭВМ производства американских компаний (HP, IBM и т.д.), либо на закупку комплектующих американских компаний (Intel, AMD и т.д.) и создания на их основе супер-ЭВМ силами отечественных специалистов. Адресно были выделены средства на создание суперкомпьютеров терафлопного класса (от нескольких десятков до нескольких сотен Терафлопс) в Российской академии наук, в ряде ведущих научных центров и высших учебных заведений России. Значительные средства были выделены также на создание телекоммуникационной инфраструктуры, призванной в частности, обеспечить доступ к этим суперкомпьютерным ресурсам. Предполагалось, что прикладное программное обеспечение этих супер-ЭВМ и технология его применения будет создано в рамках бюджетов научных центров, институтов РАН, ВУЗов и собственных средств промышленных предприятий и проектных институтов.

В рамках такого финансирования были созданы только лабораторные или, в лучшем случае, экспериментальные образцы прикладных программных систем и технологий применения практически неотчуждаемые от разработчиков и, конечно, не обладающих необходимыми продуктовыми свойствами. Как следствие, основная масса потенциальных потребителей высокопроизводительных вычислений и в науке и в образовании и в промышленности использует для проведения расчетов доступные на коммерческом рынке зарубежные программные системы, обладающие качествами программного продукта (STAR-CD, LS-DYNA, ECLIPSE и т.д.). Доступные основной массе российских потребителей пакеты предсказательного моделирования рассчитаны либо на кластеры с небольшим числом процессоров (10-30), либо на персональный компьютер с одним многоядерным микропроцессором. Именно эти зарубежные аппаратно-программные комплексы использует в повседневной работе основная масса потенциальных отечественных потребителей высокопроизводительных

вычислений. Это обстоятельство существенно ограничивает возможности исследователей, конструкторов и технологов при проведении вариантного анализа развития природных процессов, поведения и функционирования конструкций и технологических маршрутов изготовления изделий. Так, например, время расчета одного варианта задачи статической прочности для рамы грузового автомобиля в упрощенной постановке (сеточная модель с 200-300 тысячами узлов) составляет несколько часов. Время расчета одного варианта в случае динамического анализа этой же конструкции при том же количестве узлов потребует уже нескольких дней работы персонального компьютера. То есть задачи разрушения конструкции (креш-тесты) даже на уровне отдельных агрегатных узлов в этих условиях решить невозможно. Для этого требуется суперкомпьютер с производительностью не менее 40-50 Тфлопс и соответствующей программной системой прочностного анализа.

Существуют версии зарубежных пакетов машиностроительного моделирования для супер-ЭВМ с 1000 микропроцессоров, которые доступны в России только ограниченному кругу владельцев установок такой мощности, обладающих также еще и финансовыми возможностями для приобретения соответствующих лицензий на права их использования и не подпадающих под ограничения на области применения. Из этого, в частности, следует, что пользователи этих пакетов на супер-ЭВМ с 10000 процессоров смогут **использовать только одну десятую всей ее вычислительной мощности**. Это означает в частности, что существующие в России мощные суперкомпьютеры с десятками тысяч микропроцессоров, с точки зрения исполнения на них даже этих более мощных версий, является совокупностью десятков отдельных кластеров с тысячей микропроцессоров в каждом.

## ***II.2. Технологии компьютерных испытаний в авиационном комплексе России.***

В авиационной промышленности время расчета одного варианта при решении задач общей и динамической прочности при числе узлов сеточной модели порядка  $10^5$  в настоящее время составляет порядка 140 часов. При необходимости по числу узлов не менее  $10^7$ , и времени расчета одного варианта не более 12 часов. Время расчета одного варианта задачи оптимизации, в сильно упрощенной постановке, с числом узлов порядка  $10^4$  составляет около 7200 часов, при необходимости по числу узлов не менее  $10^8$ , и времени расчета одного варианта не более 120 часов.

Следствием таких больших времен счета отдельных задач проектирования на имеющейся технике является наличие постоянной очереди к вычислительным ресурсам среди расчетных подразделений предприятий и организаций авиационной промышленности, вынужденное упрощение расчетных схем решения задач, и, как следствие, **пропуск критических мест и порождение ошибок, которые обнаруживаются только в процессе испытаний изделий**.

В настоящее время суммарная производительность расчетного комплекса типичного авиационного предприятия России составляет, в лучшем случае,

единицы Терафлопс. Из-за такого **дефицита высокопроизводительных вычислительных ресурсов** отечественные предприятия и организации авиационной промышленности существенно уступают зарубежным компаниям. Решение задач  $\sim 10^6$  уравнений на сегодняшний день для отечественных авиационных предприятий является скорее исключением, нежели повседневной практикой. Отсутствует развитая сеть высокопроизводительных вычислений для прецизионного моделирования, практически все используемое программно-аппаратное обеспечение иностранного производства. Для сравнения, компания Боинг при проектировании самолета Боинг-787 затратила на высокопроизводительную обработку данных ресурсы эквивалентные непрерывной трехсменной работе **в течение трех лет 50 супер-ЭВМ терафлопного класса**. В 2007 году в рамках программы ASCI компанией Пратт-Уитни совместно со Стенфордским университетом был создан программный комплекс, моделирующий в трехмерной постановке авиационный газотурбинный двигатель для суперкомпьютера BLUE GENE производительностью **360 Тфлопс**. Верификация и валидация программных комплексов такой сложности требует порядка **7-8 лет**. Поэтому следует ожидать, что **не позднее 2015 года** этот программный комплекс будет включен в производственный процесс проектирования двигателей в этой компании.

### ***II.3. Технологии компьютерных испытаний в нефтегазовой отрасли***

Для построения гидродинамической модели нефтегазового месторождения последние двадцать лет наиболее широко используются в нефтегазовой отрасли России гидродинамические симуляторы ECLIPSE фирмы Schlumberger и VIP (США), Tempest More фирмы ROXAR (Норвегия) и STARS фирмы Modeling Group Ltd (Канада). Все эти программные системы функционируют только на персональном компьютере с одним многоядерным микропроцессором. Компания Schlumberger объявила о создании версии ECLIPSE для 64<sup>x</sup> процессоров, однако в России она пока недоступна.

В этих условиях время расчета одного варианта научных и промышленных задач при **традиционных способах разработки** составляет для месторождения с **50 скважинами 5 суток**, а для месторождения с **1000 скважинами 90 суток**. Аналогичные времена в случае использования **методов повышения нефтегазоотдачи** составляют уже **60 суток (50 скважин) и 36 месяцев (1000 скважин)** соответственно. Другими словами, в существующих условиях не представляется возможным осуществлять гидродинамическое моделирование с точностью и скоростью, необходимой для оперативного управления разработкой нефтяных месторождений **с количеством скважин на одном объекте более 100**; рассчитывать с помощью гидродинамического моделирования местоположение целиков нефти, не вовлеченных в разработку на уже заводненных нефтяных месторождениях; а так же проектировать (не говоря уже о регулировании) применение инновационных методов разработки трудноизвлекаемых запасов нефти с точным расчетом показателей разработки по всему объекту **при количестве скважин на объекте более 30**.

Время расчета на компактной супер-ЭВМ (КС-ЭВМ) производительностью 3-5 Тфлопс для расчетов одного варианта при традиционных способах разработки на месторождениях с **50 скважинами составит около 2 часов** (вместо **120 часов** на персональном компьютере), а на месторождении с **1000 скважинами – около 30 часов** (вместо **трех месяцев** на персональном компьютере). Расчет одного варианта при использовании методов повышения нефтеотдачи на КС-ЭВМ на месторождении с **50 скважин потребует около 20 часов** (вместо **60 суток** на персональном компьютере), а на месторождении с **1000 скважинами - 12 суток** (вместо **36 месяцев** на персональном компьютере).

В целом нефтегазовой отрасли до 2015г. для решения научных и промысловых задач при оперативном управлении традиционными способами разработки нефтяных и газовых месторождений на основе периодически обновляемых моделей и поиска невовлеченных в процесс разработки целиков нефти на заводненных залежах при количестве скважин на объекте разработки **50 и 1000** с извлекаемыми запасами нефти от нескольких **десятков до нескольких сотен миллионов тонн** необходимо более:

- 40 супер-ЭВМ с производительностью **300-500 Тфлопс**
- 100 супер-ЭВМ с производительностью **50-100 Тфлопс**
- 500 КС-ЭВМ с производительностью **3-5 Тфлопс**

В масштабах страны это обеспечит **дополнительную добычу порядка 5-7 млрд. тонн нефти.**

Более 150 КС-ЭВМ требуется для обеспечения учебного процесса в отраслевых ВУЗах.

Конечно, необходимым условием оснащения нефтегазовой отрасли этими высокопроизводительными суперкомпьютерами и обеспечение дополнительной добычи такого масштаба, является создание отечественного масштабируемого комплекса программ цифрового фильтрационного моделирования процессов разработки нефтяных месторождений – **термогидросимуляторов и технологии их применения.**

Приведенные выше оценки потребностей нефтегазовой отрасли в высокопроизводительных вычислениях хорошо согласуются со следующими экспертными оценками потребностей общемашиностроительных предприятий России:

- для **70%** задач требуется их очень быстрое решение по нахождению общих концептуальных решений, при этом не обязательно требуется высокая степень детализации (для этих задач хорошо подходят компактные супер-ЭВМ производительностью **1-5 Тфлопс**, «быстрое решение» - означает, что время расчета 1 варианта задачи, включая все подготовительное время на создание геометрии, сетки, визуализацию, не должно превышать нескольких часов – **2-3 часа** – точное время зависит от типа задачи);

- для **20-25%** задач требуется достаточно высокая детализация, но время решения этих задач, с учетом времени на подготовку – построение геометрии, сеток, подбор параметров, ограничено (для этих задач

подходит более мощные супер-ЭВМ с производительностью **30-50 Тфлопс**, а общее время решения 1 варианта не должно превышать примерно суток – **20-30 часов**);

- для **5-10 %** задач требуется и высокая (высочайшая) степень детализации и есть возможность увеличить допустимое время решения (для этих задач целесообразно применение мощных супер-ЭВМ с производительностью **300-500 Тфлопс**, а общее время решения 1 варианта задачи, с учетом времени на подготовку решения, не должно превышать примерно 1-2 недели – 100-200 часов).

#### ***II.4. Ключевой вопрос создания до 2015 года отечественных технологий компьютерных испытаний – формирование взаимосогласованной триады аппаратура – отечественные программы – отечественные технологии применения.***

Таким образом, следует констатировать, что из-за отсутствия конкурентоспособного отечественного прикладного программного обеспечения компьютерных испытаний и отработанных технологий их применения большая часть российского рынка высокопроизводительных вычислений принадлежит в части прикладных программ – ANSYS INC, MSC Software, Dassault Systemes и т.д., а в аппаратной части – персональным компьютерам и небольшим кластерам. Более того, проведение расчетов с помощью этих же зарубежных пакетов на российских супер-ЭВМ терафлопного класса фактически превращают эти, в ряде случаев достаточно мощные, установки в совокупность кластеров с относительно небольшим (десятки и сотни) числом параллельно работающих микропроцессоров.

Таким образом, первоочередной стратегической задачей формирования национальной отрасли высокопроизводительных вычислений является завершение:

- к 2013 году разработки и внедрения в авиационной, автомобильной, космической отрасли, атомной энергетике и нефтегазовой отрасли отечественных масштабируемых пакетов инженерного анализа для суперкомпьютеров традиционной кластерной архитектуры, основанной на универсальных коммерческих микропроцессорах и программных моделях Open MP и MPI.
- к 2015 году разработки версий этих отечественных пакетов для персональных компьютеров и небольших кластеров, с целью вытеснения с внутреннего отечественного рынка аналогичных зарубежных пакетов инженерного анализа; оснащение промышленных предприятий и инженерных ВУЗов суперкомпьютерами всего спектра производительностей (3-5 Тфлопс, 50-100 Тфлопс, 300-500 Тфлопс) в требуемых количествах.