

О нашем светлом суперкомпьютерном будущем

Носов Ю.Р.

В конце января с.г. мне довелось побывать на ежегодной научной сессии МИФИ (он теперь имеет приставку Национальный исследовательский ядерный университет, НИЯУ), где проблемы микроэлектроники и в особенности ее радиационной стойкости обсуждаются квалифицированно и очень заинтересованно на кафедре профессора В.С. Першенкова. По сложившейся традиции, первым ставится заказной доклад кого-нибудь из приглашенных светил научного мира, в прошлые годы здесь выступали акад. А.А. Орликовский, директор Физико-технологического института РАН; Герой соцтруда А.А. Бриш, легендарный сподвижник великого Ю.Б. Харитона в деле создания первых ядерных зарядов; трижды лауреат Госпремии В.И. Стафеев, один из первопроходцев полупроводниковой физики; другие яркие фигуры. Сегодня – это академик В.Б. Бетелин, директор академического института системных исследований, демонстрирующего наивысшие отечественные достижения в области наноразмерных СБИС.

Послушать Владимира Борисовича приехали специалисты многих московских предприятий, но все же больше всего студентов, они облепили даже подоконники, а кто-то остался в коридоре за открытой дверью. Этот неподдельный интерес к выступлению именно студентов – первое сильное впечатление от конференции, очень внятная реплика в адрес пишущих о «бездуховности

нашей молодежи». Негромкая, их относительно немного, как, впрочем, и в более счастливые времена, но trend исторического развития, его прогресса, а не прозябания, всегда определяет творческое меньшинство.

В далекие шестидесятые годы будущий академик очень хотел поступить в МИФИ, но не прошел по зрению, окончил мехмат МГУ, о чем, конечно же, не жалеет, стал ведущим специалистом страны в сфере программного обеспечения суперкомпьютеров. Чувствуется, здесь ему комфортно выступать перед этой, почти «своей», аудиторией. И аудитория, затаив дыхание, полтора часа слушала общие рассуждения о прошлом, настоящем и будущем, чувствовалось, что это посыл, message всем-всем-всем униженной нашей науки, вкуче с образованием. (Что бы ни говорилось властями о необходимости модернизации, но в одночасье отдать науку на откуп людям сдержанно равнодушным и уверенно одномерным – вау! Пожалуй, Туполев, Королев, Минц, работая в шарашках, не были так унижены, все искупалось настоящим, жизненно важным для страны Делом).



БЕТЕЛИН Владимир Борисович

Советский и российский специалист в области автоматизации программирования. Академик РАН (с 2003 года), член Президиума РАН. Директор Научно-исследовательского института системных исследований РАН, вице-президент РНЦ «Курчатовский институт».

Главными направлениями научной деятельности являются теория и практика разработки инструментальных систем программного обеспечения, систем интерактивной машинной графики и геометрического моделирования, а также программных систем машиностроительных САПР.

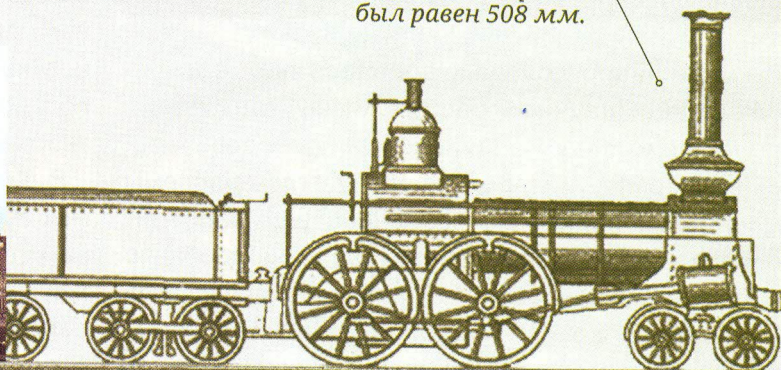


13 ноября 1851 года

Николаевская железная дорога соединила две российские столицы: в 11 часов 15 минут из Петербурга отправился пассажирский поезд, который прибыл в Москву на следующие сутки в девять часов утра. В пути он пробыл 21 час 45 минут.

Николаевский вокзал в Петербурге

Первый русский магистральный пассажирский паровоз серии В имел огромные колеса диаметром 1705 миллиметров. Диаметр цилиндра паровой машины составлял 406,4 мм, ход поршня был равен 508 мм.



Итак, **«Суперкомпьютерные технологии экзафлопного класса – ключевой фактор развития русской инженерной школы в XXI веке».**

В.Б. Бетелин, 29.01.2014.

Начнем со второй части этой формулы, здесь можно обойтись без пояснений. Прежде всего, отметим, что В.Б. (да простит нам докладчик эту аббревиатуру) говорит просто и однозначно о «русской инженерной школе», ни восторженной патетики, ни толерантности на грани абсурда. В XX веке мы говорили о создателях, творцах, главных конструкторах, разработчиках, перетаскивали их и в XXI век, а В.Б. возвращает нас в золотой XIX век, когда появилось гордое «инженер», означаящее сочетание технического образования, знания, ума и способности создавать новые вещи (машины, мосты, корабли). «Русская школа», разумеется, формировалась не по крови ее авторов и адептов, к ней относили все то, что дала миру Россия в царское, советское или в теперешнее, непонятно какое, время.

Для классического периода истории русской инженерной школы, т.е. для XIX и XX веков, В.Б. выделяет следующие основные моменты:

1. Государственный инструмент обеспечения технологического лидерства (или паритета) с промышленно развитыми странами в ключевых военных и гражданских областях.
2. Единое государственное целеполагание для триады: наука, образование, промышленность.
3. Масштабные научно-технические проекты.
4. Культ знаний в области точных наук – высокий государственный и общественный авторитет и престиж – инженера, ученого, профессора.
5. Объективный критерий успеха триады – сложные технические системы.
6. Личный успех инженера, ученого, профессора – успех государства и общества.
7. Техническое творчество.



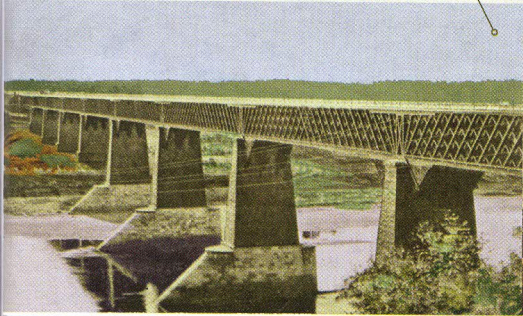
19 мая 1891 года

Началось строительство Транссибирской железнодорожной магистрали, которая соединила Европейскую часть, Урал, Сибирь и Дальний Восток России. Стоимость строительства Транссиба с 1891 по 1913 год составила 1 455 413 000 руб. (в ценах 1913 года). Все строительство было осуществлено за счет казны, без иностранных займов.

Мстинский мост на 117-й версте, построенный инженером Крутиковым. Он имел девять пролетов в 28,7 сажени каждый.

Круглое депо у Красного пруда в Москве стояло на самом берегу, что вызвало серьезные изменения в проекте по сравнению с типовым решением.

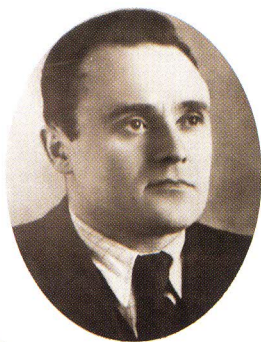
Николаевский вокзал в Москве



Характерно, что все эти положения, по мнению В.Б., сохраняют свою значимость равно и в царской, и в советской России, т.е. по сути своей являются универсальными, обязательными для инженерной школы как таковой, вне зависимости от существующего строя. (Сам докладчик напрямую не говорит, но его перечисление (1-7) явно и достаточно язвительно адресовано нынешнему времени: где ныне триада – наука, образование, промышленность, где масштабные и сложные технические проекты (состоявшиеся), где «культ знаний», где «государственное целеполагание»?)

Самое выразительное подтверждение достижений русской инженерной школы в XIX веке – это формирование сети российских железных дорог и создание железнодорожной отрасли промышленности. Первая в России Царскосельская железная дорога (1836–1838 гг.) стала не только подиумом для демонстрации нарядов великосветских дам, но и полигоном обкатки различных технических решений для скорого покорения железными дорогами бескрайних просторов России. Император Николай I, известный нам жестоким подавлением восстания

декабристов и введением палочной дисциплины в армии, в эти годы произнес свое знаменитое «Мы – инженеры» (кто из наших последующих правителей рискнул хотя бы подумать так?) и поручил профессорам Мельникову и Крафту возглавить строительство железной дороги Петербург–Москва (1842–1851 гг.). Характерно – в те времена профессора могли прокладывать дороги, строить мосты, учить не только студентов, но и дорожных рабочих. «Все работали восторженно! – гордились порученной миссией», но не менее важно, что тогда же, используя основы сопромата и строительной механики, поручик Д.И. Журавский создал теорию раскосных ферм, использованную при строительстве восьми больших железнодорожных мостов. В последующие 40 лет (1837–1877 гг.) было построено 20 тысяч верст железных дорог «русскими материалами, на русские деньги и русскими руками», а в последующие годы введено в строй десять паровозостроительных заводов (коломенский, сормовский, путиловский и др.) и шестнадцать заводов, производящих рельсы. И это притом, что активно против выступала «партия» поклонников старины – «наши деды сплавляли



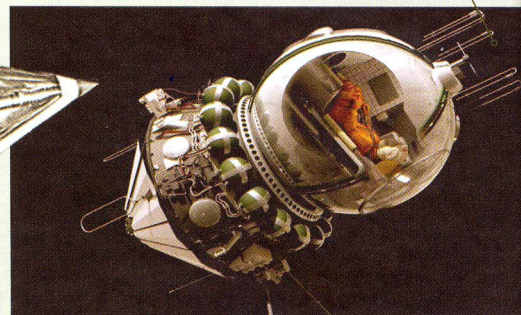
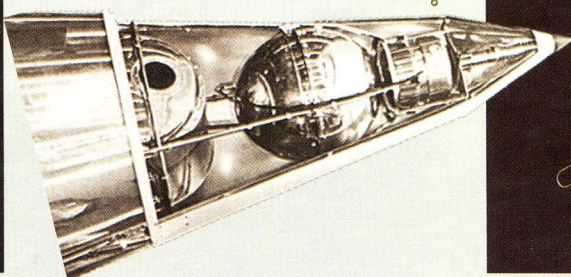
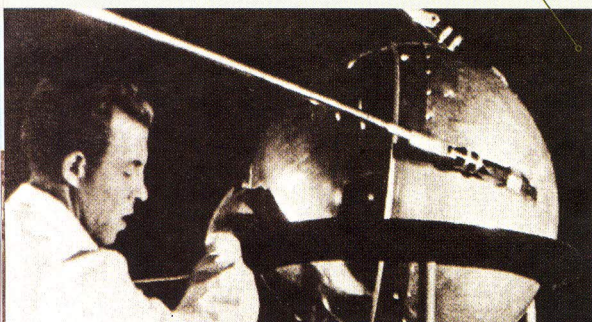
12 апреля 1961 года

С. П. Королёв поражает мировую общественность: создав первый пилотируемый космический корабль «Восток-1», он реализует первый в мире полет человека – гражданина СССР Юрия Алексеевича Гагарина по околоземной орбите.

Первый искусственный спутник Земли был запущен на орбиту 4 октября 1957 года в СССР.

Второй космический аппарат, запущенный на орбиту Земли 3 ноября 1957, впервые выведший в космос живое существо – собаку Лайку.

12 апреля 1961 года состоялся запуск первого пилотируемого космического корабля «Восток» с человеком на борту.



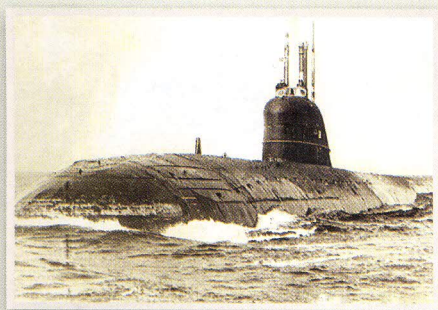
товары по рекам и преуспевали не хуже нынешних». Венцом железнодорожного проекта стала транссибирская магистраль, она строилась «долгие» 15 лет (1891–1905 гг.); напомним, что московское четвертое транспортное кольцо, преодолев за 6 лет (2008–2014 гг.) трехкилометровый отрезок от Щелковского шоссе до шоссе Энтузиастов, по-видимому, на этом успехе почил навсегда.

Корифей русской инженерной школы С.П. Тимошенко (1878–1972 гг.), разделивший жизнь пополам между Россией и за границей, в 1920-е годы, уже работая в «Вестингаузе», удивлялся низкому уровню технического образования в США по сравнению с Петербургским и Киевским, но позднее отмечал также и то, что «правительство, поняв это, действовало энергично и не жалело средств для подготовки докторов в области технических наук». Молодая Америка в своем индустриальном прорыве не боялась набивать шишки (за десятилетие 1878–1887 гг. у них случилось 250 аварий мостов!), не стеснялась и умела учиться у других, это позднее она заметно забурела. Как бы то ни было, но многие наши инженеры сумели реализовать свой

потенциал именно в США, навскидку вспомним А. Лодыгина, И. Сикорского, В. Зворыкина.

В XX веке, несмотря на революционные катаклизмы и войны, прогресс русской инженерной школы получил новое ускорение благодаря все более усиливающейся заинтересованности государства в достижении технологического паритета с промышленно развитыми странами, в первую очередь с Германией и США. И, как и прежде, фундаментом этого прогресса мог служить, по мнению акад. В.Б. Бетелина, только и исключительно высокий уровень образования в области технических наук. «Россия почти полностью вернулась к образовательной системе, которая существовала перед коммунистической революцией. Традиции старой школы оказались очень сильными, а с помощью остатков старых преподавательских кадров было возможным привести в порядок инженерное образование, разрушенное во время революции» (С.П. Тимошенко, во время его посещения СССР в 1958 г.).

Определяющие масштабные прорывы XX века – это атомная техника и авиа- ракетно-космическая



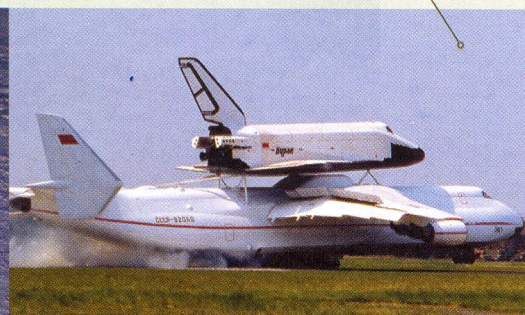
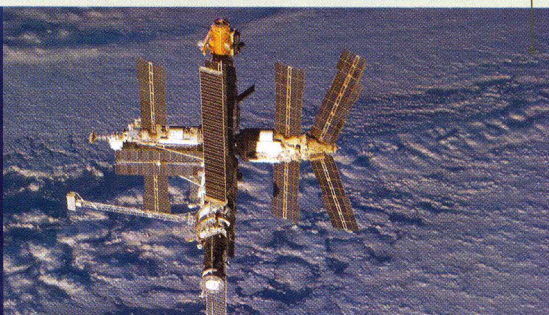
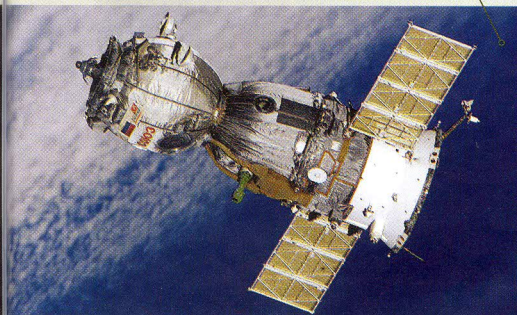
4 июля 1958 года в 10.03

Впервые в истории отечественного подводного флота атомная подводная лодка начала движение с атомной энергетической установкой. А.П. Александров, руководивший испытаниями АЭУ, записал в вахтенном журнале АПЛ: «Впервые в стране на турбину без угля и мазута был подан пар». Начался исторический отсчет морских миль, пройденных отечественным атомным флотом.

Первый советский пилотируемый космический корабль (КК) серии «Союз-1», запущенный на орбиту 23 апреля 1967 года.

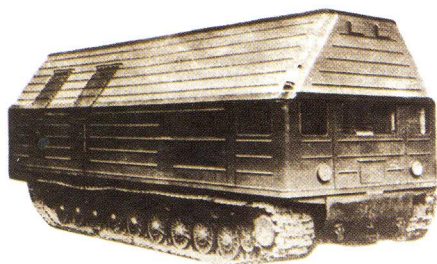
Базовый блок станции «Мир» был выведен на орбиту 20 февраля 1986 года. Затем в течение 10 лет были пристыкованы еще шесть модулей.

Свой первый и единственный космический полет «Буран» совершил 15 ноября 1988 года.



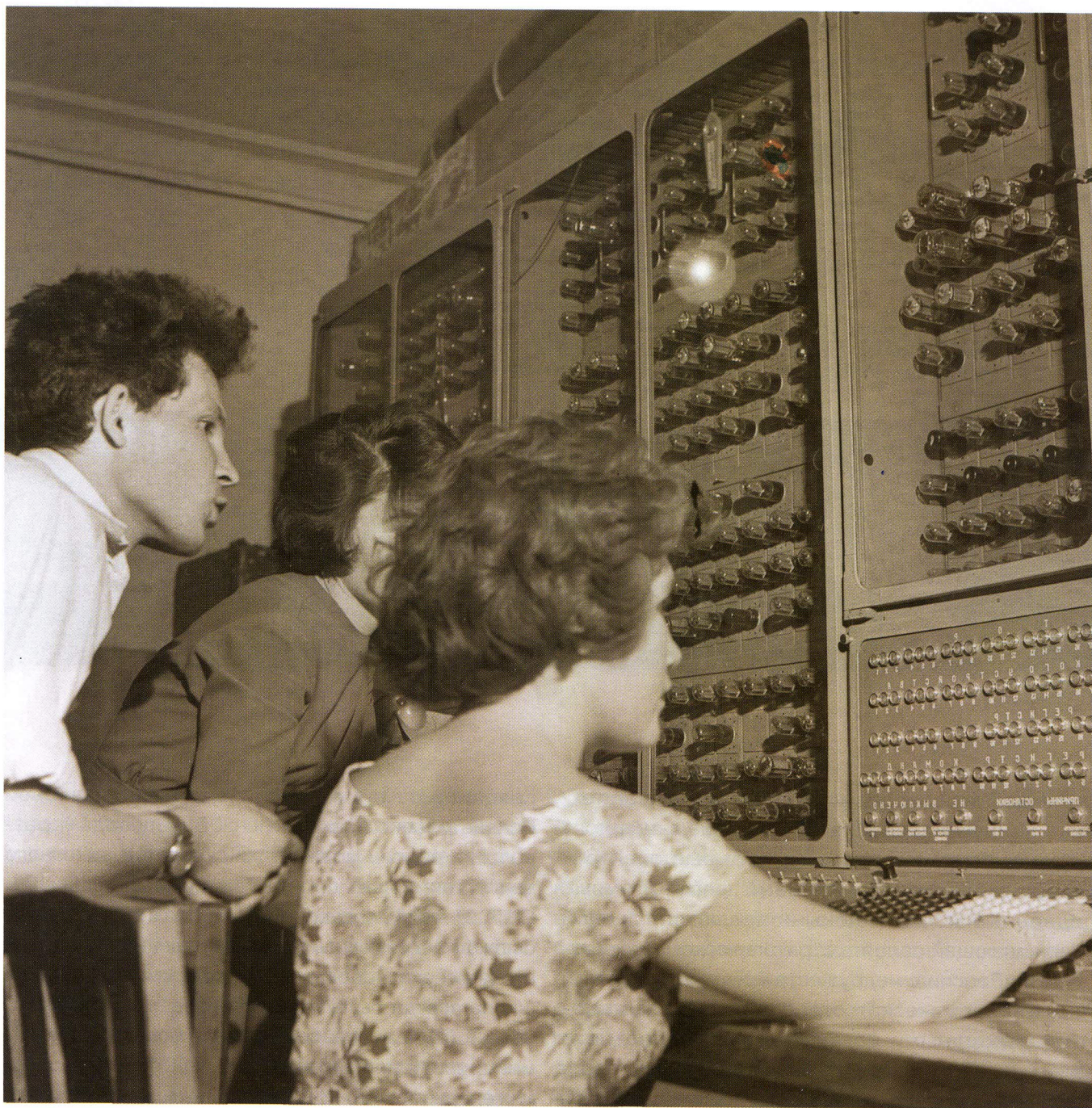
отрасль. Характерно, что прорыв в атомной технике не ограничился лишь созданием ядерного оружия, получили развитие атомные электростанции, был создан атомный флот; атомные подводные лодки и поныне являются главной сдерживающей силой в стратегическом противостоянии России с недружественным окружением. Ракетно-космическая отрасль отметилась многими рекордными достижениями глобального значения: запуск первого космического спутника (1957 г.), полет первого человека в космос (1961 г.),

создание самой мощной межконтинентальной баллистической ракеты РС-20В («Воевода»), разработка самого мощного жидкостного ракетного двигателя, до сих пор поставляемого по заказам США. И вновь, подчеркнул В.Б., все эти свершения были бы невозможны без кардинальных изменений в техническом образовании, русская инженерная школа всегда была тесно связана с наукой, и эта связь с годами становилась все более необходимой и все более упрочнялась. В XIX веке русские инженеры отличались углубленным знанием мате-



ПЕРЕДВИЖНАЯ АЭС «ТЭС-3»

Первая «ТЭС-3» поступила в опытную эксплуатацию в 1961 г. Это была экспериментальная установка для обеспечения энергией труднодоступных районов страны. «ТЭС-3» состояла из реактора, парогенераторной установки, турбогенератора, пульта управления и вспомогательного оборудования на четырех гусеничных шасси на базе танка Т-10. Мощность 1,5-2 МВт, срок службы на одной загрузке – до года, вес одного самоходного модуля – 90 т. Всего модулей – 4.



Первая ЭВМ в Башкирском государственном университете.

матики, прикладной механики, основ сопромата. В этом отношении наше МВТУ (изначально, с 1868 г. Императорское техническое училище) существенно превосходило Массачусетский технологический институт (изначально, с 1865 г. располагавшийся в Бостоне). Вызовы XX века потребовали от инженеров обязательного углубленного знания физики, так появились Московский физико-технический институт (первоначально как ФТФ МГУ) и Московский инженерно-физический институт; возникли

специальные факультеты с углубленным преподаванием физики, физхимии, электрофизики в МЭИ, ЛЭТИ, Киевском Госуниверситете, МХТИ им. Д.Н. Менделеева...

(Жаль, что В.Б., говоря о наших прорывах XX века, ограничился атомной и авиа- ракетно-космической отраслями. По разным причинам от внимания отечественных историков техники неизменно ускользают достижения в радиоаппаратостроении и электронике, объективно свою роль

сыграли наше отставание в компьютеризации, телевидении, телефонизации страны в 1960–1970 гг. Это бросалось в глаза и надолго запомнилось (а некоторыми СМИ и специально подогревалось). Однако развитие средств радиоэлектроники для военных целей, не слишком известное широкой общественности, заслуживает более чем уважительного описания. К середине 1950-х годов была создана первая система ПВО Москвы С-25, основанная на использовании мощных радиолокаторов и управляемых зенитно-ракетных комплексов, способная отразить одновременное нападение на столицу до 1000 самых современных западных бомбардировщиков. Вся необходимая СВЧ-электроника была отечественного производства и могла изготавливаться в необходимых количествах. А с конца 1950-х годов в стране началось массовое производство полупроводниковых транзисторов и диодов, и в течение следующего десятилетия количество полупроводниковых заводов превысило 50. Ничего подобного не было тогда ни в одной стране мира, кроме США. Затем началась эпоха отечественной микроэлектроники. Все, начиная от обычных вооружений и кончая сложными системами управления баллистическими ракетами стратегического назначения, комплектовалось исключительно отечественными электронными комплектующими. Более того, оборонная техника до сих пор использует немало комплектующих, разработанных в 1970–1980 годы. В заключение этого отступления от доклада акад. В.Б. Бетелина отметим, что создание электронной промышленности, хотя и не отмечено атмосферой такого трагизма, как создание атомной отрасли, но потребовало от страны высочайшего напряжения творческих сил, а по своему существованию современная электроника, пожалуй, самая наукоемкая отрасль – **Ю.Н.**

Вплоть до известных событий 1990-х годов, приведших к катастрофическому (и, по-видимому, необратимому. – **Ю.Н.**) развалу экономики и общего уклада жизни, стране еще как-то удавалось поддерживать баланс в триаде – наука, образование, промышленность. Но сохранила ли русская инженерная школа достаточный потенциал, чтобы без страха встретить вызовы XXI века?

Мир все увереннее вступает в постиндустриальную эпоху, эпоху информатики, в которой символом могущества страны становятся суперкомпьютеры, теория и практика создания и применения суперкомпьютерных технологий. Классифицирующим параметром любого компьютера и суперкомпьютера, в частности, является его производительность, П, измеряемая количеством элементарных операций, выполняемых в единицу времени; принято, $1 \text{ опер/с} = 1 \text{ флоп} (= \text{flop})$. Используемые применительно к сверхпроизводительным вычислительным системам приставки означают: тера= 10^{12} , пета= 10^{15} , экса= 10^{18} . Суперкомпьютеры в их современном представлении начались с достижения П=1Тфлопс, преодоление этой границы ведущие компьютерные страны осуществили очень стремительно.

Определяющая западная суперкомпьютерная программа ASCI (1997–2010 гг.), нацеленная на обеспечение военной безопасности США средствами тера- и петафлопной технологии, была ориентирована (на 90%) на замену натуральных испытаний ядерных боезарядов предсказательным моделированием на супер-ЭВМ и полунатурными экспериментами. Вообще необходимость использования все более высокопроизводительных компьютеров продиктована усложнением технических систем, с которыми приходится иметь дело человечеству, и эволюцией технологии их создания. Так, для относительно простых объектов (автомо-



МЕЖКОНТИНЕНТАЛЬНАЯ БАЛЛИСТИЧЕСКАЯ РАКЕТА РС-20В «ВОЕВОДА»

Первый ракетный полк под командованием подполковника О.И. Карпова с ракетным комплексом (РК) РС-20В «Воевода» заступил на боевое дежурство 25 лет назад в Домбаровском ракетном соединении (Оренбургская обл.). Ракета имеет максимальную дальность 115 00 км при стартовой массе более 210 т и может нести полезную нагрузку 8800 кг. Оснащена разделяющейся головной частью типа «MIRV» с 10 боевыми блоками мощностью от 0,55 до 0,75 Мт.

биль, бензиновый двигатель, винтокрылый самолет) существовала принципиальная возможность непосредственного измерения основных параметров функционирования. Поэтому их технология включает инженерные расчеты, изготовление опытного образца, предварительную оценку ключевых параметров, стендовые и натурные испытания. Нередко эти процедуры повторяются два или более раз. Для более сложных современных технических систем (ядерное оружие, изделия биоинженерии, реактивные двигатели) возникает принципиальная невозможность непосредственного измерения сверхвысоких скоростей, давлений, температур, физических процессов функционирования нового изделия. Кроме того, эти системы столь дороги, что прежние технологии (многократные натурные и стендовые испытания, «доводка» изготовленного изделия и т.п.) фактически не могут быть применены. Поэтому компьютерные испытания становятся (должны стать) основным инструментом отработки изделия, в ряде случаев и зачетные контрольные испытания должны выполняться на компьютере (как, например, ядерные взрывы, запрещенные международными соглашениями).

На период 2010–2020–2030 гг. в США запланирована программа энергетической безопасности, реализация которой требует уже компьютеров экзафлопного класса. Только на таких компьютерах возможно адекватное моделирование современных и будущих задач энергетики. Прежде всего это оптимизация сжигания углеводородов, этот процесс будет определяющим (на 85–88%), по крайней мере, еще 30–50 лет из-за огромной стоимости уже созданной инфраструктуры (так, транспорт США потребляет 2/3 добываемой нефти). Сюда же относятся и новые способы добычи нефти (из нефтяных песков, сланцев). Экзафлопные компьютеры позволяют осуществлять многомасштабное моделирование процессов сгорания новых видов топлива (например, биотоплива) в двигателях новых конструкций от течения реакций на уровне отдельных молекул (!) до образования вихрей при передаче топлива в камеру сгорания. В атомной энергетике новые суперкомпьютеры позволяют осуществлять моделирование всей АЭС (от ТВЭЛ'ов до утилизации отходов). В ветроэлектроэнергетике анализ вихрей вблизи ветряков и в радиусе до 50 км позволяет довести значимость этой отрасли до 20% всей потребляемой энергии. Молекулярное моделиро-

вание биоструктур из миллионов атомов позволит сократить потребление бензина на 20%.

Экзафлопная компьютерная технология – это не просто очередное, текущее повышение производительности, это качественный скачок как по достигаемым результатам, так и по возникающим трудностям. Из приведенных примеров видно, что моделирование процессов и объектов может осуществляться вплоть до предельного – молекулярного – уровня, дальнейший прогресс в повышении производительности существенно новых результатов уже не принесет. Принципиальными вопросами создания экзафлопных компьютеров будут отказ от адаптации старого программного обеспечения и создание нового, а также парирование ошибок, которые из исключительного события превратятся в ординарное и частое.

Что касается возможности создания отечественного суперкомпьютера экзафлопного класса, то здесь, кроме принципиальных, возникают и более прозаические вопросы: возможно ли создание хотя бы прототипа к 2018 г. того, что американцами запланировано к 2016 г.; будут ли доступны комплектующие для такого компьютера на массовом коммерческом рынке; каковы перспективы использования массовых коммерческих потоковых графических ускорителей и потоковых моделей `opengl`, `cuda`, являются ли необходимым условием создания российского экзафлопного суперкомпьютера разработка и производство в России собственной элементной базы? (Отрицательный ответ на последний вопрос закроет дорогу суперкомпьютерам в сферу оборонных задач, а на решение гражданских проблем вряд ли в стране найдется финансирование – Ю.Н.).

Фактически на этом академик В.Б. Бетелин завершил свое выступление. Последующие вопросы, переходящие в частное обсуждение, показали, что в своей практической деятельности аудитория крайне далека от затронутой проблематики и восприняла это сообщение как интересную просветительскую лекцию крупного ученого, находящегося на переднем крае компьютерной и микроэлектронной науки и техники. Вместе с тем, экскурсы докладчика в прошлое русской инженерной школы (роль государства в масштабных научно-технических проектах, неразрывность триады «наука–образование–промышленность», «культ знаний» и престиж инженера и др.) получили живой отклик и поддержку слушателей.



НЕОБХОДИМОЕ ДОПОЛНЕНИЕ (Ю.Н.):

В последней редакции списка наиболее производительных суперкомпьютеров TOP500 (17.06.13) первую строчку занимает ЭВМ китайского университета оборонных исследований Tianhe-2 («Млечный путь») с производительностью ~ 34 Петафлопс, кроме нее, в первой десятке разместились 5 компьютеров США (с П от ~ 4 до 18 Петафлопс), 2 – Германии и 1 – Японии. В производителях доминирует IBM. Похоже, что для КНР и США достижение экзафлопной границы потребует не более 3–5 лет, т.е. состоится в 2016–2018 гг. Отечественный суперкомпьютер Lomonosov (МГУ) с производительностью 0,9 Петафлопс занимает неплохую 31 строчку, компьютер Центра РАН – 72-ю, еще 6 – в 3-5 сотнях.

Изготовители всех отечественных супер-ЭВМ – иностранцы. На Первом национальном суперкомпьютерном форуме (29-30.11.12) отмечено, что «наши успехи (как это не обидно) пока что можно измерять лишь степенью отставания от передовых в этой области стран». Причина – в тяжелом «наследии» 1990-х годов и отсутствии четких программ развития в предыдущее десятилетие. Тем не менее, если в 2009 году наше отставание было более чем в 100 раз, то к 2012/2013 гг. оно уменьшилось почти на порядок. Кроме того, с 2012 г. начинают получать использование отечественные пакеты программного обеспечения. Общее заключение организаторов форума: «Российская суперкомпьютерная отрасль наконец встала на ноги». **НБ**