

ЛЕКЦИЯ 1

Большие задачи и большие компьютеры

Содержание: *компьютеры как эффективный инструмент численных исследований, дискретизация объектов, примеры больших задач – моделирование климатической системы и обтекания летательных аппаратов, взаимосвязь компьютеров и задач, необходимость создания больших вычислительных систем, этапы численного эксперимента.*

Если создают большие вычислительные системы, значит они для чего-то нужны. Это что-то – большие задачи, которые постоянно возникают в самых различных сферах деятельности. Практическая потребность или просто любознательность всегда ставили перед человеком трудные вопросы, на которые нужно было получать ответы. Строится высотное здание в опасной зоне. Выдержит ли оно сильные ветровые нагрузки и колебания почвы? Проектируется новый тип самолета. Как он будет вести себя при различных режимах полета? Уже сейчас зафиксировано потепление климата на нашей планете и отмечены негативные последствия этого явления. А каким будет климат через сто и более лет?

Подобного рода вопросы сотнями и тысячами возникают в каждой области. Уже давно разработаны общие принципы поиска ответов. Первое, что пытаются сделать, – это построить математическую модель, адекватно отражающую изучаемое явление или объект. Как правило, математическая модель представляет некоторую совокупность дифференциальных, алгебраических или каких-то других соотношений, определенных в области, так или иначе связанной с предметом исследований. Решения этих соотношений и должны давать ответы на поставленные вопросы.

Никакие компьютеры сами по себе не могут решить ни одной содержательной задачи. Они способны выполнять лишь небольшое число очень простых действий. Вся их интеллектуальная сила определяется программами, составленными человеком. Программы также реализуют последовательности простых действий. Но эти действия целенаправленные. Поэтому *искусство решать задачи на компьютере есть искусство превращения процесса поиска решения в процесс выполнения последовательности простых действий.* Называется такое искусство разработкой алгоритмов.

Если математическая модель построена, то следующее, что надо сделать, – это разработать алгоритм решения задачи, описывающей модель. Довольно часто в его основе лежит принцип *дискретизации* изучаемого объекта и, если необходимо, окружающей его среды. Исследуемый объект и среда разбиваются на отдельные элементы и на эти элементы переносятся связи,

диктуемые математической моделью. В результате получаются системы уравнений с очень большим числом неизвестных. В простейших случаях число неизвестных пропорционально числу элементов. Для сложных моделей оно на несколько десятичных порядков больше. Вообще говоря, чем мельче выбирать элементы разбиения, тем точнее получается результат. В большинстве задач уровень разбиения определяется только возможностью компьютера решить возникшую систему уравнений за разумное время. Но в некоторых задачах, таких как изучение структуры белковых соединений, расшифровка геномов живых организмов, разбиение по самой сути может доходить до уровня отдельных атомов. И тогда вычислительные проблемы становятся исключительно сложными даже для самых мощных компьютеров.

Во все времена были задачи, решение которых находилось на грани возможностей существовавших средств. Вплоть до середины двадцатого столетия единственным вычислительным средством был человек, вооруженный в лучшем случае арифмометром или электрической счетной машиной. Решение наиболее крупных задач требовало привлечения до сотни и более расчетчиков. Так как вычисления они проводили одновременно, то по существу такой коллектив своими действиями моделировал работу вычислительной системы, которую теперь принято называть многопроцессорной. Роль отдельного процессора в этой системе выполнял отдельный человек. При подобной организации вычислений никак не могло появиться большое число крупных задач. Их просто некому было считать. Поэтому еще 50 – 60 лет назад весьма распространенным являлось мнение, что несколько мощных компьютеров смогут решить все практически необходимые задачи.

История опрокинула эти прогнозы. Компьютеры оказались настолько эффективным инструментом, что новые и очень крупные задачи стали возникать не только в традиционных для вычислений областях, но даже в таких, где раньше большие вычислительные работы не проводились. Например, в военном деле, управлении, биологии и т. п. К тому же, использование компьютеров освободило человека от нудного и скрупулезного труда, связанного с выполнением операций. Это позволило ему направить свой интеллект на постановку новых задач, построение математических моделей, разработку алгоритмов и при этом не бояться больших объемов вычислений. Подобные обстоятельства и привели к массовой загрузке компьютеров решением самых разных проблем, в том числе, очень крупных. Случилось то, что и должно было случиться: за исключением начального периода развития компьютеров спрос на самые большие вычислительные мощности всегда опережал и опережает предложение таких мощностей. Другое дело, что реализовать как спрос, так и предложение оказалось трудно.

Большие задачи и компьютеры представляют две *взаимосвязанные* сферы деятельности, два конца одной веревки. Если был один конец – большие задачи, значит должен был появиться и другой – компьютеры. Потребность в

решении больших задач заставляет создавать более совершенные компьютеры. В свою очередь, более совершенные компьютеры позволяют улучшать математические модели и ставить еще большие задачи. В конце концов, обыкновенные компьютеры превратились в параллельные. Задачи от этого параллельными не стали, но начали развиваться алгоритмы с параллельной структурой вычислений. В результате опять появилась возможность увеличить размеры решаемых задач. Теперь на очереди стоят оптические и квантовые компьютеры. Конца этому процессу не видно.

На примере проблем моделирования климатической системы и исследования обтекания летательных аппаратов покажем, как конкретно возникают очень большие задачи и что они за собой влекут.

В современном понимании климатическая система включает в себя атмосферу, океан, сушу, криосферу и биоту. Климатом называется ансамбль состояний, который система проходит за достаточно большой промежуток времени. Климатическая модель – это математическая модель, описывающая климатическую систему. В основе климатической модели лежат уравнения динамики сплошной среды и уравнения равновесной термодинамики. Кроме этого, в модели описываются все энергетически значимые физические процессы: перенос излучения в атмосфере, фазовые переходы воды, облака и конвенция, перенос малых газовых примесей и их трансформация, мелкомасштабная турбулентная диффузия тепла и диссипация кинетической энергии и многое другое. В целом модель представляет систему трехмерных нелинейных уравнений с частными производными. Решения этой системы должны воспроизводить все важные характеристики ансамбля состояний реальной климатической системы.

Даже без дальнейших уточнений понятно, что климатическая модель исключительно сложна. Работая с ней, приходится принимать во внимание ряд серьезных обстоятельств. В отличие от многих естественных наук, в климате *нельзя поставить глобальный натурный целенаправленный эксперимент*. Следовательно, единственный путь изучения климата – это проводить численные эксперименты с математической моделью и сравнивать модельные результаты с результатами наблюдений. Однако и здесь не все так просто. Математические модели для разных составляющих климатической системы развиты не одинаково. Исторически первой стала создаваться модель атмосферы. Она и в настоящее время является наиболее развитой. К тому же, за сотни лет наблюдений за ее состоянием накопилось довольно много эмпирических данных. Так что в атмосфере есть с чем сравнивать модельные результаты. Для других составляющих климатической системы результатов наблюдений существенно меньше. Слабее развиты и соответствующие математические модели. По существу только начинает создаваться модель биоты.

Общая модель климата пока еще далека от своего завершения. Не во всем даже ясно, как могла бы выглядеть совместная идеальная модель. Чтобы

приблизить климатическую модель к реальности, приходится проводить очень много численных экспериментов и на основе анализа результатов вносить в нее коррективы. Как правило, пока эксперименты проводятся с моделями для отдельных составляющих климата или для некоторых их комбинаций. Наиболее часто рассматривается совместная модель атмосферы и океана. Недостающие данные от других составляющих берутся либо из результатов наблюдений, либо из каких-то других соображений.

Важнейшей проблемой современности является проблема изменения климата под влиянием изменения концентрации малых газовых составляющих, таких как углекислый газ, озон и др. Как уже отмечалось, климатический прогноз может быть осуществлен только с помощью численных экспериментов над моделью. Поэтому ясно, что для того чтобы научиться предсказывать изменение климата в будущем, уже сегодня надо иметь возможность проводить большой объем вычислений. Попробуем хотя бы как-то его оценить.

Рассмотрим модель атмосферы как важнейшей составляющей климата и предположим, что мы интересуемся развитием атмосферных процессов на протяжении, например, 100 лет. При построении алгоритмов нахождения численных решений используется упоминавшийся ранее принцип дискретизации. Общее число элементов, на которые разбивается атмосфера в современных моделях определяется сеткой с шагом в 1° по широте и долготе на всей поверхности земного шара и 40 слоями по высоте. Это дает около $2,6 \times 10^6$ элементов. Каждый элемент описывается примерно 10 компонентами. Следовательно, в любой фиксированный момент времени состояние атмосферы на земном шаре характеризуется ансамблем из $2,6 \times 10^7$ чисел. Условия обработки численных результатов требуют нахождения всех ансамблей через каждые 10 минут, т.е. за период 100 лет необходимо определить около $5,3 \times 10^4$ ансамблей. Итого, только за *один* численный эксперимент приходится вычислять $1,4 \times 10^{14}$ значимых результатов промежуточных вычислений. Если теперь принять во внимание, что для получения и дальнейшей обработки каждого промежуточного результата нужно выполнить $10^2 - 10^3$ арифметических операций, то это означает, что для проведения одного численного эксперимента с глобальной моделью атмосферы необходимо выполнить порядка $10^{16} - 10^{17}$ арифметических операций с плавающей запятой.

Таким образом, вычислительная система с производительностью 10^{12} операций в секунду будет осуществлять такой эксперимент при полной своей загрузке и эффективном программировании в течение нескольких часов. Использование полной климатической модели увеличивает это время, как минимум, на порядок. Еще на порядок может увеличиться время за счет не лучшего программирования и накладных расходов при компиляции программ и т.п. А сколько нужно проводить подобных экспериментов! Поэтому

вычислительная система с *триллионной* скоростью совсем не кажется излишне быстрой с точки зрения потребностей изучения климатических проблем.

Большой объем вычислений в климатической модели и важность связанных с ней выводов для различных сфер деятельности человека являются постоянными стимулами в деле совершенствования вычислительной техники. Так, на заре ее развития одним из следствий необходимости разработки эффективного вычислительного инструмента для решения задач прогноза погоды стало создание Дж. фон Нейманом самой теории построения компьютера. В нашумевших в свое время проектах вычислительных систем пятого поколения и во многих современных амбициозных проектах климатические модели постоянно фигурируют как потребители очень больших скоростей счета. Наконец, существуют проекты построения вычислительных систем огромной производительности, предназначенных специально для решения климатических проблем.

Имеется и обратное влияние. Развитие вычислительной техники позволяет решать задачи все больших размеров. Корректное решение больших задач заставляет развивать новые разделы математики. Как уже говорилось, изучение предсказуемости климата требует определения решения систем дифференциальных уравнений на очень большом отрезке времени. Но это имеет смысл делать лишь в том случае, когда решение обладает определенной устойчивостью к малым возмущениям. Одна из составляющих климатической системы, а именно атмосфера, относится к классу так называемых открытых, т. е. имеющих внешний приток энергии и ее диссипацию, нелинейных систем, траектории которых неустойчивы поточно. Такие системы имеют совершенно особое свойство. При больших временах их решения оказываются вблизи некоторого многообразия относительно небольшой размерности. Открытие данного свойства послужило сильным толчком к развитию теории нелинейных диссипативных систем методами качественной теории дифференциальных уравнений. В свою очередь, это существенно усложнило вычислительные задачи, возникающие при климатическом прогнозе, что опять требует больших вычислительных мощностей.

Приведенные доводы, скорее всего, убедили читателя, что для исследования климата действительно нужна очень мощная вычислительная система. Тем более, что климат нельзя изучать, выполняя над ним целенаправленные эксперименты. Однако остается вопрос, насколько много необходимо иметь таких систем. Ведь основная деятельность человека связана с созданием материальных объектов, с чем или над чем можно проводить натурные эксперименты. Например, летательные аппараты можно испытывать в аэродинамических трубах, материалы – на стендах, сооружения – на макетах и т. п. Конечно, здесь также нужно проводить какие-то расчеты. Но стоит ли для этих целей использовать вычислительные системы, стоящие не один миллион долларов? Возможно, для подобных расчетов достаточно ограничиться хорошим персональным компьютером или рабочей станцией?

Ответ зависит от конкретной ситуации. Возьмем для примера такую проблему, как разработка ядерного оружия. Пока не был установлен мораторий на ядерные испытания, натурные эксперименты давали много информации о путях совершенствования оружия. И хотя при этом приходилось проводить очень большой объем вычислений, все же удавалось обходиться вычислительной техникой не самого высокого уровня. После вступления моратория в силу остался *единственный* путь совершенствования оружия – это проведение численных экспериментов с математической моделью. По своей сложности соответствующая модель сопоставима с климатической и для работы с ней уже нужна самая мощная вычислительная техника. В аналогичном положении находится ядерная энергетика. А такая проблема как расшифровка генома человека. Здесь также *невозможны* никакие глобальные эксперименты и опять нужна мощная техника. Вообще, оказывается, что проблем, где *нельзя или трудно проводить натурные эксперименты*, не так уж мало. Это – экономика, экология, астрофизика, медицина и т. д. При этом часто возникают очень большие задачи.

Интересно отметить, что даже там, где натурные эксперименты являются привычным инструментом исследования, большие вычислительные системы начинают активно использоваться. Рассмотрим, например, проблему компоновки летательного аппарата, обладающего минимальным лобовым сопротивлением, максимально возможными значениями аэродинамического качества и допустимого коэффициента подъемной силы при благоприятных характеристиках устойчивости и управляемости в эксплуатационных режимах. Для ее решения традиционно использовались продувки отдельных деталей аппарата или его макета в аэродинамических трубах. Но вот несколько цифр. При создании в начале века самолета братьев Райт эксперименты в аэродинамических трубах обошлись в несколько десятков тысяч долларов, бомбардировщик 40-х гг. потребовал миллион, а корабль многоразового пользования "Шатл" – 100 млн. долларов. Столь же сильно возрастает время продувки в расчете на одну трубу – почти 10 лет для современного аэробуса. Однако несмотря на огромные денежные и временные затраты, продувки в аэродинамических трубах не дают полной картины обтекания хотя бы просто потому, что обдуваемый образец нельзя окружить датчиками во всех точках. Для преодоления этих трудностей также пришлось обратиться к численным экспериментам с математической моделью.

Определять аэродинамические характеристики летательного аппарата необходимо уже на стадии проектирования. Необходимо также давать оценку различным вариантам компоновки, оптимизировать геометрические параметры, определять внешний облик с наилучшими характеристиками. Знание соответствующих данных нужно и в процессе летных испытаний при анализе их результатов для выработки рекомендаций по устранению выявленных недостатков. Эта задача не может быть решена без информации об обтекании элементов аппарата и поле течения в целом. Как уже говорилось

экспериментальное получение такой информации по мере усложнения летательных аппаратов становится все более труднодоступным делом.

В практике работы конструкторских организаций используются инженерные методы расчета, основанные на упрощенных математических моделях. Эти методы пригодны на самых ранних этапах проектирования. Они не могут учесть деталей течения, необходимых на углубленных этапах проектирования, и не могут обеспечить требуемую точность расчетов. В большой области изменения физических параметров упрощенные модели вообще не применимы. Для углубленной стадии проектирования летательных аппаратов перспективными являются математические модели, основанные на нестационарных пространственных уравнениях динамики невязкого, нетеплопроводного газа, в том числе, учитывающие уравнения состояния и уравнения вязкого пограничного слоя между поверхностью аппарата и обтекаемой средой. Модели принципиально различаются для случаев сверхзвукового и дозвукового набегающего потока. Вообще говоря, случай дозвукового обтекания сложнее, так как около летательного аппарата возможно образование местных сверхзвуковых зон. Все части аппарата здесь взаимно влияют друг на друга и задача должна решаться глобально, т. е. во всей области, окружающей летательный аппарат. Именно для расчета дозвуковых течений необходимо использовать вычислительные системы высокой производительности с большим объемом памяти.

Приведем некоторые данные конкретного расчета. Рассчитывались различные варианты дозвукового обтекания летательного аппарата сложной конструкции. Математическая модель требует задания граничных условий на бесконечности. Реально, конечно, область исследования берется конечной. Однако из-за обратного влияния границы ее удаление от объекта должно быть значительным по всем направлениям. На практике это составляет десятки длин размера аппарата. Таким образом, область исследования оказывается трехмерной и весьма большой. При построении алгоритмов нахождения численных решений опять используется принцип дискретизации. Из-за сложной конфигурации летательного аппарата разбиение выбирается очень неоднородным. Общее число элементов, на которые разбивается область, определяется сеткой с числом шагов порядка 10^2 по каждому измерению, т. е. всего будет порядка 10^6 элементов. В каждой точке надо знать 5 величин. Следовательно, на одном временном слое число неизвестных будет равно 5×10^6 . Для изучения нестационарного режима приходится искать решения в $10^2 - 10^4$ слоях по времени. Поэтому одних только значимых результатов промежуточных вычислений необходимо найти около $10^9 - 10^{11}$. Для получения каждого из них и дальнейшей его обработки нужно выполнить $10^2 - 10^3$ арифметических операций. И это только для одного варианта компоновки и режима обтекания. А всего требуется провести расчеты для десятков вариантов. Приближенные оценки показывают, что общее число операций для решения задачи обтекания летательного аппарата в рамках современной

модели составляет величину $10^{15} - 10^{16}$. Для достижения реального времени выполнения таких расчетов быстроедействие вычислительной системы должно быть не менее $10^9 - 10^{10}$ арифметических операций с плавающей запятой в секунду при оперативной памяти не менее 10^9 слов.

Успехи в численном решении задач обтекания позволили создать *комбинированную* технологию разработки летательных аппаратов. Теперь основные эксперименты, особенно на начальной стадии проектирования, проводятся с математической моделью. Они позволяют достаточно достоверно определить оптимальную компоновку, проанализировать все стадии процесса обтекания, выявить потенциально опасные режимы полета и многое другое. Все это дает возможность снизить до минимума дорогостоящие натурные эксперименты в аэродинамических трубах и сделать их более целенаправленными. Конечно, численные эксперименты на высокопроизводительных вычислительных системах тоже обходятся недешево. Но все же они значительно дешевле, чем натурные эксперименты. Кроме этого, их стоимость постоянно снижается. Например, по данным США она уменьшается в 10 раз каждые 10 лет. Объединение численных и натуральных экспериментов в единый технологический процесс привело к принципиально новому уровню аэродинамического проектирования. В результате значительно возросло качество, уменьшились стоимость, сроки проектирования и время испытаний летательных аппаратов. Совершенствование математических моделей сделает этот процесс еще более эффективным. Как и в примере с климатом, более совершенные модели потребуют применения более мощных вычислительных систем. В свою очередь, появление новых систем опять даст толчок совершенствованию моделей и т. д. Снова убеждаемся в том, что большие задачи и большие вычислительные системы с точки зрения их развития *оказывают влияние друг на друга*.

В рассмотренной проблеме выбора компоновки летательного аппарата легко увидеть нечто большее, имеющее отношение к самым различным областям деятельности человека. В самом деле, при создании тех или иных изделий, механизмов и сооружений, также как и при проведении многих научных экспериментов весь процесс от возникновения идеи до ее реализации можно грубо разбить на следующие этапы. Сначала каким-то способом разрабатывается общий проект и готовится технологическая документация. Затем строится опытный образец или его макет. И, наконец, проводится испытание. По его результатам в опытный образец вносятся изменения и снова проводится испытание. Цикл образец – испытание – образец повторяется до тех пор, пока опытный образец не станет действующим, удовлетворяя всем заложенным в проект требованиям. Проведение каждого испытания и внесение очередных изменений в опытный образец почти всегда требует много денег и много времени. Поэтому одна из общих задач заключается в том, чтобы на пути превращения опытного образца в действующий сократить до минимума как число испытаний, так и их стоимость и время проведения.

По существу это можно сделать единственным способом — заменить часть натуральных экспериментов или большинство из них, а в идеале даже все, *экспериментами с математическими моделями*. Значимость численных экспериментов в общем процессе зависит от качества модели. Если она хорошо отражает создаваемый или изучаемый объект, натурные эксперименты оказываются необходимыми достаточно редко, что, в свою очередь, приводит к большим материальным и временным выгодам. В этой ситуации весь процесс во многом превращается в своего рода компьютерную игру, в которой можно посмотреть различные варианты решений, обнаружить и исследовать узкие места, выбрать оптимальный вариант, проанализировать последствия такого выбора и т. д. И лишь изредка отдельные решения придется проверять на натуральных экспериментах. Это обстоятельство, безусловно, стимулирует создание самых совершенных математических моделей в различных областях.

Очевидно, что использование математических моделей невозможно без применения вычислительной техники. Но оказывается, что для очень многих случаев нужна не просто какая-нибудь техника, а именно высокопроизводительная. В самом деле, изучаем ли мы процесс добычи нефти, или прочность кузова автомобиля, или процессы преобразования электрической энергии в больших трансформаторах и т. п., — исследуемые объекты являются трехмерными. Чтобы получить приемлемую точность численного решения объект нужно покрыть сеткой не менее чем $100 \times 100 \times 100$ узлов. В каждой точке сетки нужно определить 5 – 20 функций. Если изучается нестационарное поведение объекта, то состояние всего ансамбля значений функций нужно определить в 10^2 – 10^4 моментах времени. Поэтому только значимых результатов промежуточных вычислений для подобных объектов нужно получить порядка 10^9 – 10^{11} . Теперь надо принять во внимание, что на вычисление и обработку каждого из промежуточных результатов, как показывает практика, требуется в среднем выполнить 10^2 – 10^3 арифметических операций. И вот мы уже видим, что для проведения только одного варианта численного эксперимента число операций порядка 10^{11} – 10^{14} является вполне рядовым. А теперь учтите число вариантов, накладные расходы на время решения задачи, появляющиеся за счет качества программирования, компиляции и работы операционной системы. И сразу становится ясно, что скорость вычислительной техники должна измеряться многими *миллиардами* и даже *триллионами* операций в секунду. Такая техника стоит недешево. Тем не менее, как говорится, игра стоит свеч.



Рис. 1.1. Этапы численного эксперимента.

Мы неоднократно подчеркивали влияние больших задач на развитие вычислительной техники и наоборот. Постепенно в эту сферу втягивается много чего другого. Развитие математического моделирования приводит к более сложным описаниям моделей. Для их осмысления и разработки принципов исследования приходится привлекать новейшие достижения из самых разных областей математики. Дискретизация задач приводит к системам уравнений с огромным числом неизвестных. Прежние методы их решения не всегда оказываются пригодными по соображениям точности, скорости, требуемой памяти, структуре алгоритмов и т.п. Возникают и реализуются новые идеи в области вычислительной математики. В конечном счете, для более совершенных математических моделей создаются новые методы реализации численных экспериментов. Как правило, они требуют больших вычислительных затрат и снова не хватает вычислительных мощностей. А далее опять все идет по кругу, о чем уже не один раз говорилось выше.

Решаясь на регулярное использование больших численных экспериментов, приходится заботиться о качестве их проведения. Оно определяется многими факторами. Основные этапы, которые проходит каждый эксперимент, отражены на рис. 1.1. Данным рисунком мы хотим подчеркнуть простую мысль:

если хотя бы один из этапов, изображенных на рис. 1.1 окажется не эффективным, то не эффективным будет и весь численный эксперимент.

Следовательно, внимательному изучению должны подвергаться все этапы численного эксперимента. Эффективность этапов, связанных с выбором численного метода и составлением программы, в значительной мере определяется пользователем. Однако работа компилятора, операционной

системы и самого компьютера ему не подвластна. Тем не менее, имеется возможность повысить эффективность и этих этапов. Связана она с выбором подходящих форм алгоритма и программы, поскольку разные программы показывают разную эффективность. Принимая во внимание особенности конкретной вычислительной системы, можно попытаться найти подходящий вариант программы. Вопрос состоит только в том, на основе каких знаний осуществлять данный выбор. Все эти обстоятельства важно понять, запомнить и постоянно учитывать на практике.

ЛЕКЦИЯ 2

Большие задачи и программирование

Содержание: *интересы специалистов и программирование, предельно сложные задачи, совершенствование техники и программирование, преемственность программных наработок, переносимость программного обеспечения, отсутствие гарантий качества компиляции, простые примеры, необходимость изучения структуры алгоритмов.*

Вроде бы все ясно. Если алгоритм разработан, вычислительная система определена, то нужно лишь выбрать один из языков программирования на этой системе и можно приступать к самому процессу написания программ. Конечно, для большой задачи этот процесс потребует какого-то времени, возможно, даже немалого, могут возникнуть трудности с отладкой. Однако в нем не видны какие-то места, требующие серьезных размышлений.

Такое мнение распространено довольно широко. Можно указать две характерные группы специалистов, в той или иной степени его поддерживающие. Во-первых, это высококлассные специалисты, решающие однотипные по структуре задачи в течение длительного периода. Они настолько хорошо знают свою предметную область, что многие трудности решения больших задач преодолевают за счет выбора подходящей реструктуризации вычислительного процесса. Но подобных специалистов не так много. И, во-вторых, это специалисты, имеющие некоторый опыт решения небольших или средних задач и лишь приступающие к большим задачам. Превысивший опыт им ничего не говорит о том, с какими новыми трудностями они могут встретиться. Таких специалистов очень много.

В обеих группах можно выделить специалистов, для которых большие задачи приходится решать *эпизодически*. Например, при численной проверке какой-либо частной гипотезы в процессе изучения той или иной проблемы. Если задача не требует предельного использования ресурсов вычислительной системы, то в этих случаях совсем *не обязательно* заботиться об эффективности функционирования составленной программы. Но есть немало