

О. М. Белоцерковский, В. Л. Якушев

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРОБЛЕМАМ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ

В работе излагается технология вычислительного эксперимента на базе параллельных методов вычислений на суперкомпьютере. Особое внимание уделяется визуализации как средству ускорения принятия решения при автоматизированном проектировании применительно к нефтегазовой тематике, биомедицине и просто механике.

Приведены примеры моделирования и визуализации взрыва газа в помещении, крупного пожара, распространения сейсмических волн, столкновения танкера-газовоза с причалом, поля скоростей течений крови в теле человека.

В прошедшем столетии в дополнение к экспериментальному и теоретическому способам проведения научных исследований был разработан третий способ — математическое моделирование (численное моделирование или вычислительный эксперимент). Математическое моделирование подразумевает, во-первых, изучение процессов (объектов, явлений), их приближенное описание на языке математических уравнений. Однако в подавляющем большинстве случаев точные решения полученных систем уравнений либо невозможны, либо они выливаются в какие-то частные решения, асимптотики, решения сильно упрощенных моделей малой размерности и т. д.; во-вторых, выбор численных методов решения полученных систем уравнений (вычислительная математика) или разработку новых; в-третьих, составление программы для компьютера, ее отладку и, наконец, получение результатов (рис. 1). Иногда говорят о триаде модель-алгоритм-программа. Важным этапом интерпретации полученных результатов является их визуализация.

Отметим здесь два момента. Один из них состоит в том, что элементы триады могут влиять друг на друга. Второй момент заключается в том, что данную цепочку придется пройти не один раз, уточняя модель, выбирая численные методы и алгоритмы, переписывая блоки программ, до тех пор, пока не будет достигнуто совпадение с результатами натуральных экспериментов или фактическими результатами, полученными после аварии или осложнений. Иногда натуральный эксперимент может быть очень дорог или очень опасен, особенно это характерно для нефтегазодобычи. В этом случае может идти речь о сравнении с серией подобранных аналитических решений.

Эта работа требует определенного искусства, большого труда, аккуратности. Но игра стоит свеч. Хорошая математическая модель с отлаженной компьютерной программой предоставляет ученому-исследователю очень широкие возможности. Он может, не проводя дорогостоящих или опасных натуральных экспериментов, изучать процессы (объекты, явления) с помощью компьютера и выяснять даже такие подробности, которые невозможно получить иначе. Это приносит огромный экономический эффект и сокращает сроки исследований.

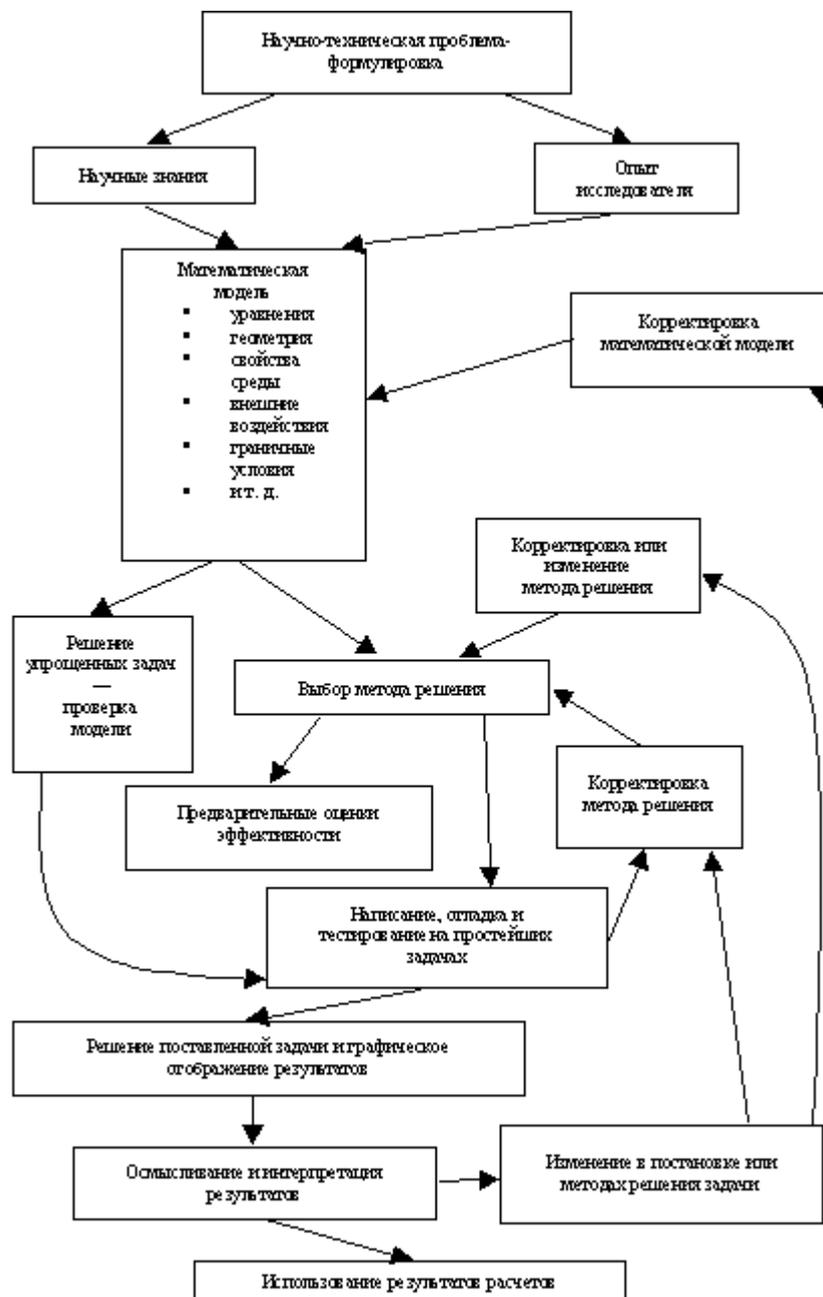


Рис. 1. Структура вычислительного эксперимента

В процессе вычислительного эксперимента (где постановка задачи, метод ее решения и реализация алгоритма рассматриваются в едином комплексе) происходит, по существу, уточнение исходной физической модели. Путем расчетов на ЭВМ различных вариантов ведется накопление фактов и результатов, что в конечном счете дает возможность произвести отбор наиболее вероятных ситуаций. Применение методов численного моделирования кажется особенно актуальным в задачах математической физики, физики плазмы, механики сплошных сред (газовой динамики, теории упругости и т. д.) [1–10].

Математическое моделирование открывает широкие перспективы для многих направлений науки и техники. Оно уже много лет используется в ядерной и авиационно-космической областях. В настоящее время математическое моделирование проникло во все отрасли естественных наук и в такие сферы человеческой деятельности, как нефтегазодобыча, транспорт, социально-экономическая сфера и пр. Конечно, наиболее успешным является использование математического моделирования там, где удастся сформулировать универсальные закономерности (например, законы сохранения в механике сплошных сред) и адекватные математические модели.

Начиная со второй половины прошлого века чрезвычайно быстро увеличивается производительность вычислительных систем, и одновременно с этим неуклонно возрастает роль вычислительных систем во всех проявлениях нашей жизни. Для математического моделирования возникающих проблем высокой сложности человечеству требуются все большая мощность вычислительных ресурсов. Рост мощности одного процессора, хотя и достаточно быстрый (с 1960-х годов идет по так называемому закону Мура: в среднем удвоение мощности процессора за каждые полтора года), не удовлетворяет требованиям времени. Дополнительно повысить мощность вычислительной системы позволяет нехитрый прием — увеличение

количества процессоров в вычислительной системе (помимо таких путей, как усложнение и наращивание аппаратных средств, организация конвейеров, создание спецпроцессоров и др.). В настоящее время в мире уже существуют вычислительные системы, содержащие тысячи процессоров, а в ближайшее время (5–10 лет) ожидается появление систем с миллионами процессорных узлов. Однако многократное увеличение количества процессоров в вычислительной системе отнюдь не означает эквивалентного сокращения времени на решение проблем. Кроме технических проблем (связанных, например, с коммуникациями между процессорами), существует другое очень серьезное ограничение. Большинство современных алгоритмов и программ являются сугубо последовательными и практически не могут эффективно использоваться на вычислительных системах с параллельной архитектурой. Необходима существенная переработка (так называемое распараллеливание) алгоритмов или создание новых эффективных параллельных алгоритмов.

Использование суперкомпьютеров и параллельных программ повышает производительность вычислений, а следовательно, и точность в порядки раз. Возможности суперкомпьютеров позволяют получать физически оправданные результаты для нестационарных пространственных задач механики сплошных сред.

Активное использование методов численного моделирования [2–10] позволяет резко сократить сроки научных и конструкторских разработок. В тех случаях, когда реальный эксперимент трудно осуществить и информация о процессе носит нечеткий, косвенный характер, математическое моделирование служит практически единственным инструментом исследования. Однако при этом ни в коей мере не должна принижаться принципиальная роль физического эксперимента. Опыт всегда останется основой всякого исследования, подтверждающего (или отвергающего) схему и решение при теоретическом подходе.

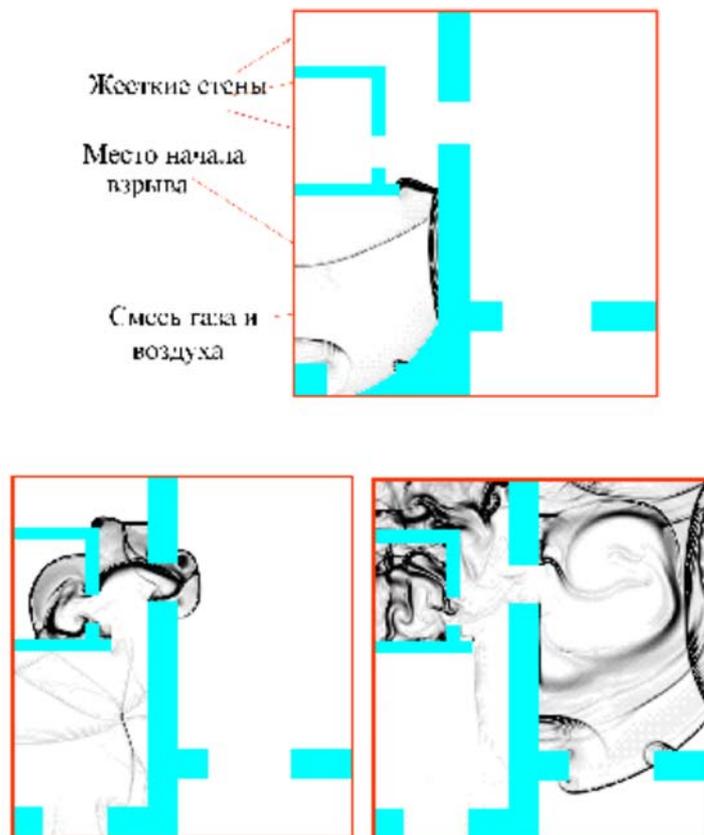


Рис. 2. Моделирование взрыва газа в помещении. Расчет для трех моментов времени (А. С. Зибаров)

В последние годы разрабатываются математическое обеспечение и пакеты прикладных программ для супер-ЭВМ с параллельной архитектурой в области вычислительной механики, САПР, биомедицинской информатики и др.; изучается комплексное применение экспертных систем и математического моделирования для решения задач специального назначения; проводятся исследования в областях фундаментальных и прикладных приложений САПР для различных направлений народного хозяйства.

Рассмотрим несколько примеров применения математического моделирования для решения важных с теоретической и практической точек зрения задач. Мы лишь обозначим некоторые детали их постановки, покажем на рисунках основные результаты.

Создан комплекс программ для решения газодинамических задач на базе метода крупных частиц, позволяющий рассматривать двух- и трехмерные течения в областях со сложными границами и свойствами среды. На рис. 2 показано распространение волн после взрыва пропана в помещении. В результате решения может быть получено распределение давления и температуры в различные моменты времени.

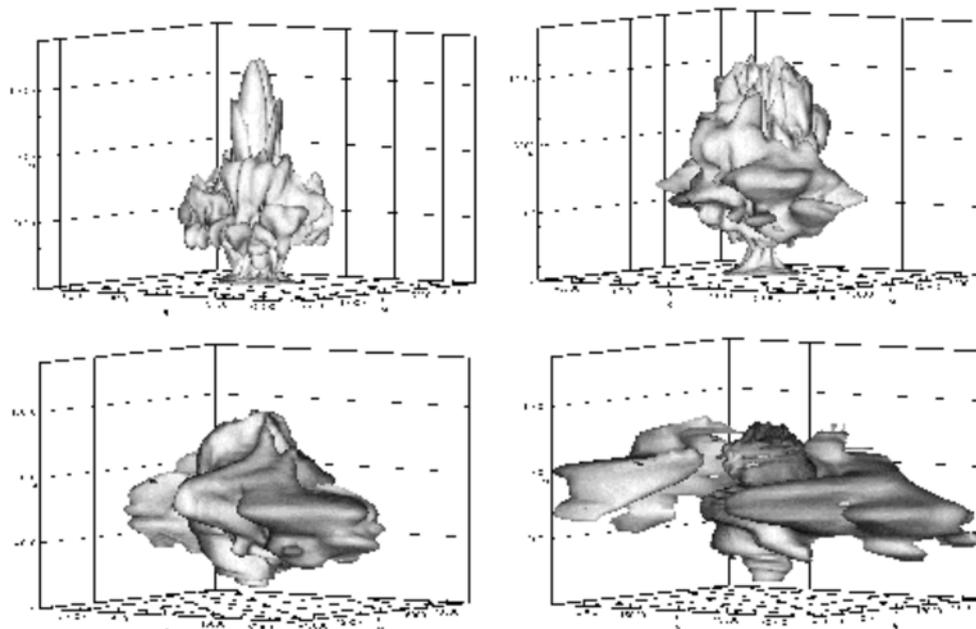


Рис. 3. Численное моделирование развития крупномасштабного пожара с начальным радиусом 10 км для промежутков времени 25, 50, 100 и 200 мин
(А. М. Опарин, Л. М. Крагинский, А. Н. Антоненко)

Была рассмотрена задача о крупномасштабном пожаре, который моделируется источником энергии на поверхности и распространяющейся в стратифицированной атмосфере пассивной примесью. Источник горения радиусом 10 км, мощность выделения энергии 0,05 МВт/кв. м. Облако горения моделируется наличием легковесной примеси, извергаемой из источника. Источник работает в течение часа, затем выключается. Расчет велся в прямоугольном параллелепипеде с горизонтальными сторонами в 60 км и высотой 24 км. На рис. 3 представлены результаты расчета в пространственной постановке для четырех моментов времени.

Следующие расчеты связаны с решением прямой задачи геофизики, которая состоит в рассмотрении прохождения звуковых волн в неоднородной земной коре. В земле на некотором расстоянии от поверхности производится точечный взрыв, звуковые волны от которого распространяются, преломляются в различных слоях и отражаются от границ раздела сред. В ряде мест производятся замеры колебаний поверхности. Сравнивая экспериментальные данные сейсмограмм и результаты численного моделирования, можно оценить разницу между реальным и модельным описанием среды. На основании этих данных определяется реальное строение и залегание пород.

На рис. 4 представлены результаты моделирования взаимодействия сейсмической волны с нефтяным месторождением в двумерной постановке. Трехмерная задача является более сложной и требует для своего решения применения многопроцессорных ЭВМ.

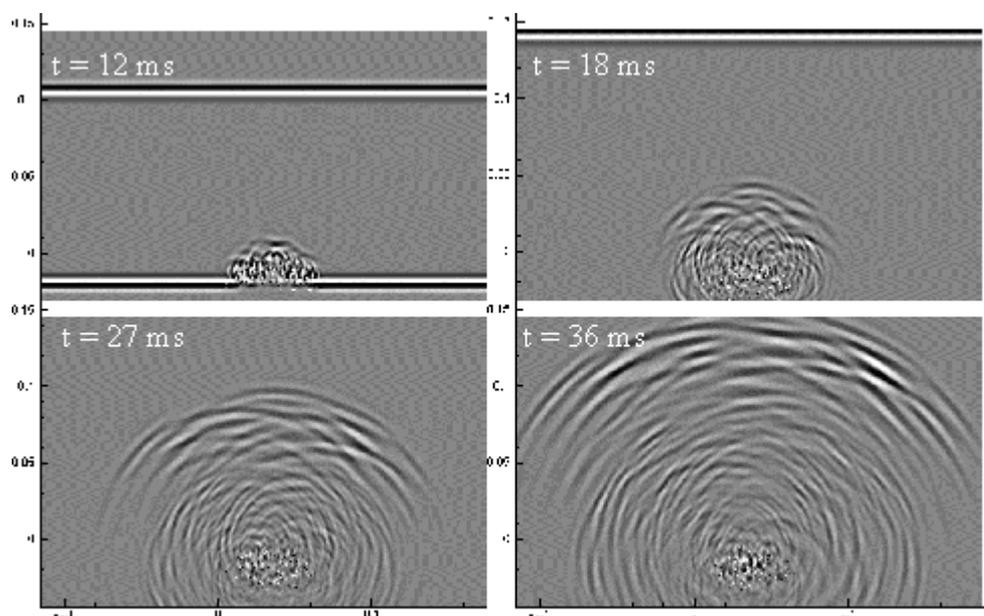


Рис. 4. Моделирование взаимодействия сейсмической волны с нефтяным месторождением (А. Н. Антоненко)

Следующий цикл расчетов связан с математическим моделированием контактного взаимодействия оболочек. Здесь рассматриваются пространственные задачи со сложной геометрией расчетной области, и для их решения использовался метод конечных элементов. Они имеют ряд практически важных приложений, в частности моделирование столкновения танкеров с причалом.

Были промоделированы различные аварийные ситуации с танкерами, предназначенными для перевозки сжиженного газа на большие расстояния. Как правило, газ перевозится в шаровых емкостях либо при большом давлении, либо при низких температурах. В случае аварии может последовать взрыв большой мощности. Поэтому рассмотрение различных воздействий на подобные суда является актуальной задачей.

На рис. 5 показаны конечно-элементная сетка, примененная для расчета динамических воздействий на конструкцию (вверху), результаты расчета удара танкера о причал (внизу). Важно подобрать такую конструкцию танкера, чтобы в аварийных ситуациях шаровые емкости остались бы неповрежденными.

Интерес представляют результаты моделирования течений со свободными границами. На рис. 6 приведено решение задачи о падении горизонтальной струи в водоем. Нижняя граница жидкости является дном, на котором заданы условия скольжения. Левая и правая границы являются открытыми, на них заданы условия продолжения решения. В начальный момент над водной поверхностью через левую границу начинает бить струя воды с постоянной горизонтальной скоростью, падающая затем в водоем.

На рис. 7 показаны результаты расчета движения вертикальной струи жидкости. Рассчитан процесс образования фонтана и лужи. Нижняя граница является непротекаемой, на ней заданы условия скольжения. Боковые и верхняя границы — открытые.

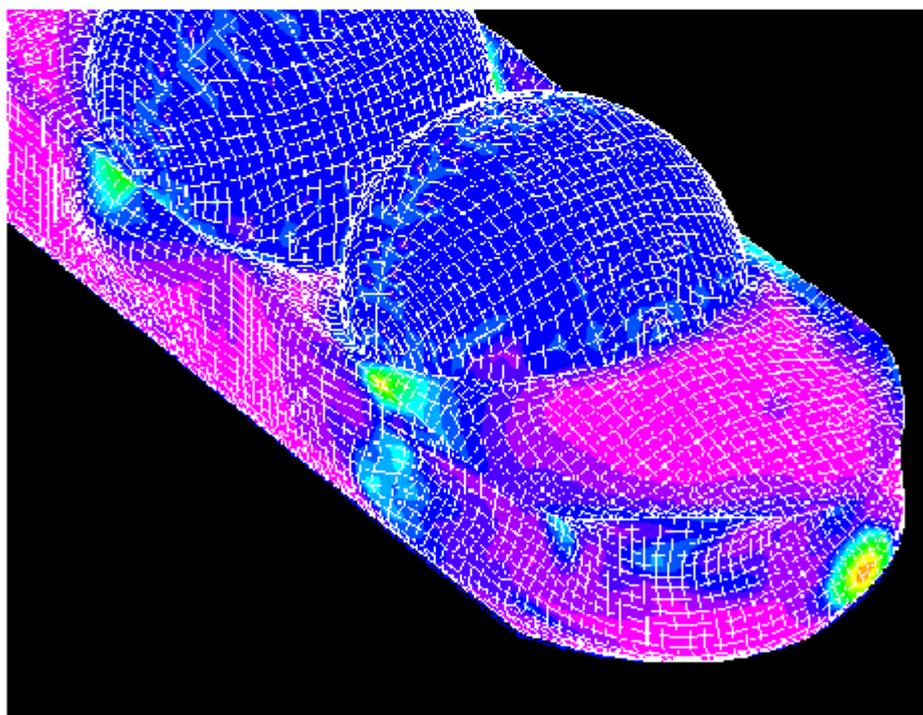
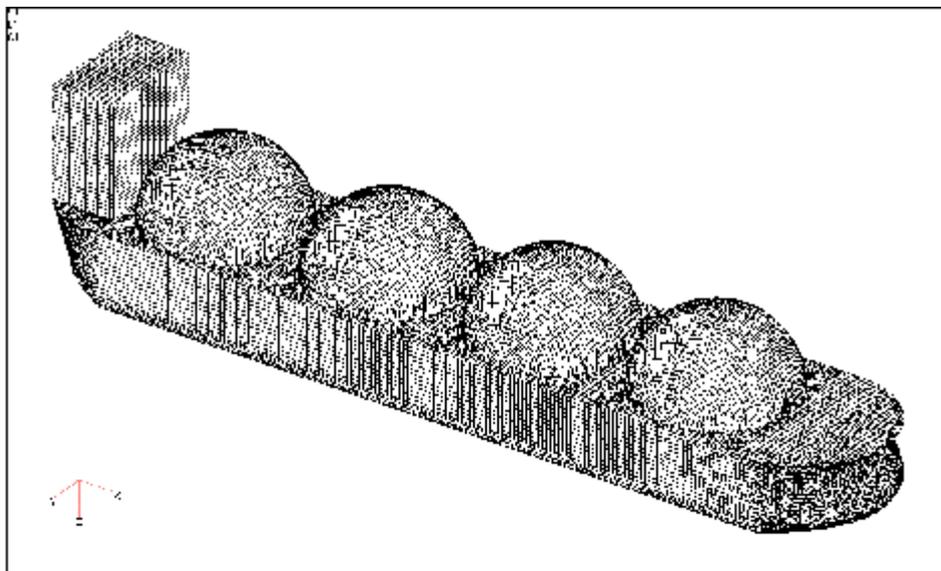


Рис. 5. Моделирование столкновения танкера для перевозки сжиженного газа с причалом (В. Л. Якушев)



Рис. 6. Падение в водоем горизонтальной струи (Н. Г. Бурого)

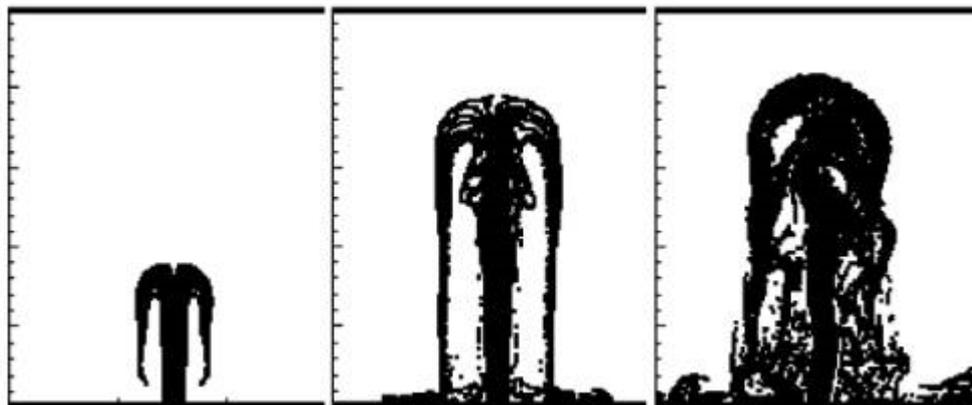


Рис. 7. Фонтан и лужа от вертикальной струи (Н. Г. Бурого)

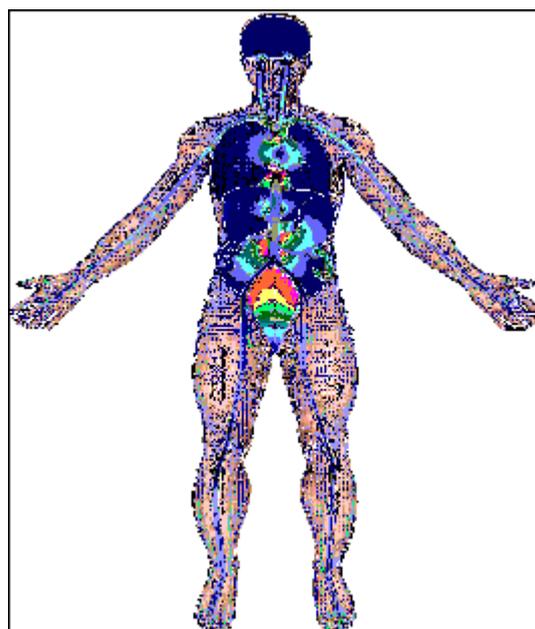


Рис. 8. Пример вычисления осредненного по времени поля скоростей течения крови в мелких сосудах (артериолы, капилляры, вены) артериальной системы человека (А. С. Холодов)

Сейчас математическое моделирование все больше проникает в медицину. Здесь используются самые разные математические модели: на основе уравнений Навье-Стокса, фильтрации несжимаемой жидкости, Эйлера и специально разработанные численные методы для очень сложных многосвязных областей интегрирования. На рис. 8 дан пример вычисления осредненного по времени поля скоростей течения крови в мелких сосудах (артериолы, капилляры, вены) артериальной системы человека (штрихи на рисунке). Вычислительная модель сводится к рассмотрению фильтрации несжимаемой жидкости в пористой среде и многосвязной области, состоящей из 20 основных органов.

В заключение заметим, что понимание важности математического моделирования нашло отражение в Комплексной программе Президиума РАН «Математическое моделирование, интеллектуальные системы и управление нелинейными механическими системами», которая была начата в 2002 г. и продолжается в настоящее время.

Литература

1. Дородницын А. А. Изб. труды. Т. 1, 2. М.: ВЦ РАН. 1997.
2. Яненко Н. Н. Метод дробных шагов для решения многомерных задач математической физики. Новосибирск: Наука, 1967.
3. Самарский А. А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1967.
4. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1967.
5. Годунов С. К., Рябенький В. С. Разностные схемы: (Введение в теорию). М.: Наука, 1977.
6. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986.
7. Белоцерковский О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1994.
8. Петров А. А. Экономика. Модели. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1996.
9. Информатика и медицина: Сб. ст. / Под ред. О. М. Белоцерковского. М.: Наука, 1997.

10. *Математическое моделирование: Проблемы и результаты*. М.: Наука, 2003. 478 с. (Информатика: неограниченные возможности и возможные ограничения).

11. Белоцерковский О. М. О математическом моделировании на суперкомпьютерах // Вестник кибернетики. Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН, 2002. Вып. 1. С. 4–9.

O. M. Belotserkovsky, V. L. Yakushev

COMPUTATION EXPERIMENTS USING SUPERCOMPUTERS WITH REGARD
TO PROBLEMS OF OIL-AND-GAS-PRODUCING TERRITORIES

The paper gives a know-how description of simulation experiment on the basis of parallel computation methods using supercomputer. Special emphasis is placed on visualization as means to speedup decision-making in automated designing to imply oil-and-gas matters, biomedicine and mechanics proper. Subject to quotation being simulation and visualization cases regarding indoors gas explosion, big fires, seismic wave propagation, gas-carrier collision against a wharf, as well as velocity fields of blood current in human body.