

ВЫСТУПЛЕНИЕ АКАДЕМИКА РАН С.Л. ЧЕРНЫШЕВА И ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА РАН А.Н. ШИПЛЮКА

Материал поступил в редакцию 03.12.2018 г.

Принят к публикации 25.12.2018 г.

Ключевые слова: суперкомпьютерные технологии, аэрокосмическая техника, летательный аппарат, проектирование, компьютерные модели, программные средства, универсальный национальный компьютерный код.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873894355-357>

Бурное развитие вычислительной физики в последние 30 лет, связанное со стремительным ростом производительности вычислительной техники и созданием коммерческих и открытых программных пакетов, сделало суперкомпьютерные технологии доступными для широкого круга инженеров и исследователей. Роль вычислительных технологий в разработке современной аэрокосмической техники постоянно повышается.

Надёжные средства численного расчёта позволяют существенно снизить стоимость и продолжительность экспериментальных работ, в частности, при проведении сертификационных испытаний, а также дополнить экспериментальные результаты более глубоким анализом физических процессов, включая протекающие в реактивных двигательных установках и при взаимодействии обтекаемого тела с потоком газа.

За последние 10 лет в использовании вычислительных методов произошёл переход от отдельных оптимальных решений по дисциплинам (аэродинамика, прочность, аэроакустика и др.) к оптимальным междисциплинарным решениям. Идёт постоянное усложнение применяемых моделей — от упрощённых потенциальных или невязких течений до течений, описываемых полными уравнениями Навье—Стокса с различными моделями турбулентности. К примеру, новые методы суперкомпьютерного моделирования при проектировании аэродинамической компоновки современного российского самолёта МС-21 позволили достичь высокого аэродинамического совершенства на толстом крыле большого удлинения с уровнем качества $K=18,2$, что является главным показателем конкурентоспособности этого авиалайнера в сравнении с воздушными судами аналогичного класса компаний "Боинг" и "Аэробус".

Сегодня на основе междисциплинарных подходов можно надёжно определять аэродинамические характеристики самолёта, на которые наиболее существенное влияние оказывают фюзеляж, механизированное крыло с предкрылком

и закрылком, пилоны, мотогондолы, крепления предкрылка и обтекатели механизмов выдвижения закрылков, а также вихрегенераторы на мотогондолах. При этом в задаче обтекания решаются уравнения Рейнольдса в частных производных в трёхмерной постановке. Для подобного расчёта аэродинамики самолёта в сложной взлётно-посадочной конфигурации с учётом работы силовой установки требуются сетки со 100—150 млн ячеек, типичное время расчёта может составлять несколько дней — это сегодняшний вычислительный уровень, достигнутый на существующих в России супер-ЭВМ. Конечно, на практике вычислительные методы и используемые программные пакеты должны быть надёжно валидированы на предмет точного соответствия расчётных моделей физическим явлениям.

Более сложная задача заключается в одновременном расчёте и оптимизации аэродинамических и аэроакустических характеристик летательного аппарата (ЛА). Так, результаты численного моделирования шума системы самолёт — крыло — двухконтурное сопло с горячей турбулентной струёй вблизи крыла с помощью программы, разработанной Центральным аэрогидродинамическим институтом (ЦАГИ) им. профессора Н.Е. Жуковского на основе полных нестационарных уравнений Навье—Стокса, потребовали достаточно подробных сеток с 200 млн ячеек. Такая густая сетка необходима для корректного вихре-разрешающего моделирования и получения статистически достоверных оценок спектров шума турбулентного течения. Характерное расчётное время одной точки составляет около недели.

В задачах аэродинамического проектирования используются всё более сложные модели течения, описывающие вихревую физику обтекания. В настоящее время идёт бурное развитие моделей на основе метода крупных вихрей (LES и DES), а также совершенствование методов прямого численного моделирования, что очень важно для задач распространения звука и моделирования отрывного обтекания в турбулентном

течении. В качестве достижения в этой области можно упомянуть работу Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН и ЦАГИ по моделированию аэродинамики и аэроакустики крыла со сложной механизацией в посадочном положении, которая выполнена под руководством академика Б.Н. Четверушкина.

Современные модели течений позволяют приступить к решению таких сложных задач, как исследование шума винта вертолёта в составе планера с целью его минимизации. Обнадёживающие результаты получены в совместной работе ЦАГИ и Сколковского института науки и технологий на основе пакета программ Пи-7, разработанного под руководством академика А.П. Кулешова.

Следующий сложный класс задач связан с численным моделированием высокоскоростных многофазных течений с множеством протекающих реакций. Проблема усложняется тем, что в гиперзвуковом течении около летательного аппарата проявляется полный набор атомно-молекулярных высокотемпературных физических явлений, включая разреженность, релаксацию внутренних степеней свободы, многокомпонентную диффузию, диссоциацию и рекомбинацию как в потоке, так и на стенке, ионизацию, радиацию и неравновесность (термическую, химическую и термодинамическую). Эти явления проявляются в макроскопической форме в виде широкого диапазона изменения определяющих критериев подобия — чисел M , Re , Kn , Dam , Sc , Le и др.

Достигнутый сегодня уровень — прямое численное моделирование течения газа с учётом неравновесных физико-химических процессов с двумя десятками химических реакций горения углеводородов, корректно описывающих взаимодействие турбулентности с горением и многофазные эффекты, например, горение и испарение капель, частицы сажи и т. п. Решение данной задачи критически важно при создании нового поколения высокоскоростных летательных аппаратов с гиперзвуковым прямоточным воздушно-реактивным двигателем.

Для возвращаемых и других высокоскоростных ЛА, осуществляющих полёт на очень больших (свыше 80 км) высотах, гипотеза сплошной среды уже не работает, и для описания течений требуются методы прямого статистического моделирования (ПСМ). Так, большая серия расчётов аэротермодинамических характеристик возвращаемого аппарата "Федерация" была выполнена с использованием ПСМ на основе пакета программ Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН для диапазона высот 85–100 км. К особенностям методов ПСМ можно отнести достаточно высокие требования к вычислительным ресурсам, которые с умень-

шением высоты полёта ЛА возрастают экспоненциально. Ключ к успеху — пакет программ с параллельными алгоритмами, ориентированный на компьютеры с параллельной архитектурой петафлопсного класса. При этом следует отметить, что применение графических процессорных устройств по сравнению с использованием обычной архитектуры обеспечивает более высокую эффективность вычислений.

Одним из заметных достижений последнего времени можно назвать успешные попытки создания единого пакета специализированных компьютерных кодов для расчётного анализа аэротермодинамики и газодинамики всех типов гиперзвуковых ЛА в широком диапазоне высот и скоростей полёта. Такой национальный пакет программ, в частности, создаётся под руководством академика С.Т. Суржикова в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН в кооперации с другими организациями. В программах, кроме основных газодинамических особенностей высокоскоростного течения в физических уравнениях, учитывается тепловое излучение на больших высотах. Результаты расчётов впечатляют, в особенности на фоне продолжающегося увеличения мощности супер-ЭВМ.

Другим примером универсального национального компьютерного кода является программный комплекс "Логос", разработанный специалистами входящего в Госкорпорацию "Росатом" ВНИИ экспериментальной физики. Он вобрал в себя многие типы течений и классы решаемых задач. Так, достигнутый в этой области уровень демонстрируют результаты моделирования обтекания полной компоновки современного манёвренного самолёта нестационарным потоком на больших углах атаки с развитыми отрывными зонами. Один расчёт на 200 ядрах занимает 170 ч на сетке размерностью 32 млн ячеек.

Широкое применение суперкомпьютерных технологий позволяет решать задачу проектирования летательных аппаратов по-новому. В инновационном подходе создаётся компьютерная модель ЛА, по сути, — это его цифровой двойник. Компьютерная модель включает:

- комплекс специализированных программ моделирования напряжённо-деформированного и теплового состояний, аэрогазодинамических и гидравлических течений, описывающих обтекание летательного аппарата и его отдельных элементов в реальных условиях эксплуатации;
- единую базу данных, содержащую подробную информацию по постановке задач, тестированию, верификации и валидации программ, подтверждающих достоверность численного моделирования прочности, тепломассопереноса, аэрогазодинамики, аэроакустики ЛА в целом

и его отдельных элементов (планера, двигателей, подвесных грузов и т. д.).

При этом в единую систему объединены базовый ряд суперкомпьютеров различной производительности, высокоскоростные каналы связи, пакеты программ с высокой степенью распараллеливания.

Показательным примером применения суперкомпьютерных технологий для задач авиастроения стало использование имитационного моделирования на супер-ЭВМ в целях сертификации новых российских пассажирских самолётов Сухой Суперджет-100 (SSJ-100) и МС-21. Достигнута высокая степень использования вычислений для обоснования надёжности и безопасности самолёта SSJ-100 в возможных аварийных ситуациях без полномасштабных экспериментальных работ. Обычно для этих целей строятся натурные макеты и стенды, стоимость которых вместе с испытаниями составляет сотни миллионов рублей. Имитационное моделирование на супер-ЭВМ получило высокую оценку сертифицирующих органов, впервые в России по этим пунктам самолёт Сухой Суперджет-100 был сертифицирован на основании расчётов без экспериментов,

что позволило сократить сроки реализации проекта и затраты на него.

Внедрение суперкомпьютерных технологий в авиастроении позволяет:

- перейти на новую систему проектирования и поддержания жизненного цикла летательных аппаратов;
- использовать трёхмерное моделирование с имитацией реальных условий эксплуатации без упрощений и допущений;
- создавать дискретные модели не с десятками, а с сотнями миллионов или миллиардов ячеек;
- решать задачи с реальными граничными условиями эксплуатации техники;
- проводить преимущественно модельные виртуальные, а не физические эксперименты.

Цифровые двойники ЛА, виртуальные испытания и сертификация – это дело ближайшего будущего или даже, по некоторым элементам, уже настоящее. Внедрение суперкомпьютерных технологий в будущем может исключить доработку самолёта, снизить технические риски, повысить информативность решения инженерных задач, обеспечить создание обширной базы знаний для развития на перспективу.

SPEECH OF THE ACADEMICIAN OF RAS S.L. CHERNYSHEV AND CORRESPONDING MEMBER OF RAS A.N. SHIPLYUK

Received: 03.12.2018

Accepted: 25.12.2018

Keywords: supercomputer technologies, aerospace engineering, aircraft, design, computer models, software, universal national computer code.