

РАЗВИТИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НА КАФЕДРЕ ГИДРОАЭРОДИНАМИКИ СОВРЕМЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Смирнов Е.М.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Изложению материала по теме, обозначенной в названии данной работы, уместно предпослать краткую ретроспективу развития методов и средств численного моделирования течений жидкости и газа. С появлением первых ЭВМ активная работа в этом направлении началась в конце 50-х годов прошлого века и традиционно относилась к области естественных наук. До середины 80-х годов возможности вычислительной гидрогазодинамики ограничивались решением важных, но, по сути, модельных задач для упрощенных геометрических и граничных условий течения. В Советском Союзе в этой области работали сотни высококлассных специалистов: достаточно упомянуть школы академиков А.А.Самарского, О.М.Белоцерковского, Н.Н.Яненко, научные коллективы в МГУ, МФТИ, ИПМ, ЦАГИ, ЦИАМ, МФТИ (Москва), ФТИ им.А.Ф.Иоффе, ГИПХ, ЦКТИ (Санкт-Петербург). В те годы уровень и практический выход проводимых в нашей стране исследований полностью отвечал, а по ряду составляющих и превосходил мировой уровень.

Принципиально новый этап в развитии вычислительной гидрогазодинамики начался в конце 80-х годов. В результате, в течение 10-15 лет сформировались наукоемкие технологии численного инженерного анализа трехмерных течений и теплообмена в условиях реальной геометрии и при реальных условиях функционирования рассматриваемых объектов. В большой мере этому способствовало развитие численного метода конечных объемов, относительно легко воспринимаемого инженерным корпусом. К сожалению, данный этап совпал с глубочайшими изменениями в обществе и экономике России и, как следствие, только единичным научным коллективам в нашей стране удалось начать и систематически продолжать работы по освоению быстро совершенствующихся составляющих вычислительных технологий и созданию отвечающих нынешним реалиям собственных программных средств, аккумулирующих усилия нескольких десятков человеко-лет.

Текущий момент характеризуется широким внедрением во все передовые отрасли науки и промышленности прикладных программных пакетов вычислительной гидрогазодинамики и теплофизики, как неотъемлемой части комплекса CAD-CAE

информационных технологий и исследовательского инструментария. Применение этих программ при проектировании образцов новой техники позволяет резко снизить затраты и сократить сроки создания новых изделий. Мировой рынок программ вычислительной гидрогазодинамики и теплофизики, представленный такими пакетами, как Fluent, Ansys-CFX, Star-CD, CFD-ACE и рядом других, превышает в годовом исчислении 300 млн. долларов и возрастает ежегодно почти на 20%. Параллельно в передовых странах на базе университетов и исследовательских центров развиваются и создаются программы вычислительной гидрогазодинамики, не имеющие столь широкого охвата прикладных задач, как коммерческие программы, но позволяющие разрабатывать и апробировать новые физические модели и математические алгоритмы, а также отрабатывать методики расчета течений, с акцентом на наиболее адекватное воспроизведение данных экспериментов. Несомненно, именно сочетание коммерческих и развитых университетских программных продуктов позволяет эффективно прикладывать достижения вычислительной гидрогазодинамики и осуществлять профессиональную подготовку специалистов, столь необходимых сегодня для промышленности, научных и образовательных учреждений.

Современные средства вычислительной гидрогазодинамики должны давать возможность:

- решать полные стационарные и нестационарные уравнения Навье-Стокса в областях произвольной геометрии;
- использовать инерциальные и неинерциальные системы отсчета, как порознь, так и совместно;
- моделировать течения при малых и больших числах Маха;
- использовать различные подходы к моделированию турбулентности (осреднение по Рейнольдсу или же различные вихре-разрешающие методы);
- решать задачи сопряженного и сложного теплообмена;
- осуществлять учет реальных свойств и многофазности среды, физико-химических процессов и т.д.;
- выполнять параллельные (распределенные) вычисления.

На кафедре гидроаэродинамики СПбГПУ электронно-вычислительная техника стала активно применяться при выполнении научно-исследовательских и выпускных дипломных работ с середины 60-х годов, а первый учебный курс, специально ориентированный на численное моделирование течений жидкости и газа, был поставлен уже в начале 70-х годов. Сегодня курс «Численные методы в

гидрогазодинамике» является на кафедре одним из самых протяженных: он идет четыре семестра и сопровождается рядом весьма сложных курсовых работ. Значительный вклад в поддержание и модернизацию этого курса вносят ученые сотрудничающих с кафедрой организаций (ФТИ им. А.Ф.Иоффе, РНЦ «Прикладная химия»).

Базовый курс по численным методам в гидрогазодинамике удачно сочетается с относительно недавно поставленными на кафедре двухсеместровыми курсами «Современные вычислительные технологии в гидрогазодинамике» и «Вычисления на многопроцессорных компьютерах». Практика по первому из этих курсов проводится как с использованием собственных разработок, охарактеризованных ниже, так и с использованием лицензионного программного пакета Fluent, установленного на компьютерах Центра высокопроизводительных вычислительных кластерных технологий СПбГПУ. Второй из новых курсов ориентирован на применение технологий параллельных вычислений, в большой мере определяющих сегодня прогресс многих отраслей науки и техники. В российских вузах образовательные программы в данной области находятся сейчас в стадии становления. Лишь несколько лет назад были изданы первые учебные пособия, в которых систематически излагаются вопросы архитектуры многопроцессорных вычислительных систем, технологий параллельного программирования и методов распараллеливания вычислительных алгоритмов. Вместе с тем, в этих разработках по существу отсутствуют «мостики», которые позволяли бы учащимся в рамках единого образовательного курса перейти от освоения базовых методов и технологий параллельного программирования и высокопроизводительных вычислений к решению сложных ресурсоемких проблем, проистекающих из сегодняшних потребностей фундаментальных и прикладных отраслей науки и техники, в том числе и проблем механики жидкости и газа. Поставленный на кафедре курс по вычислениям на многопроцессорных системах призван восполнить указанный пробел. Программа учебного курса охватывает: основы операционных систем семейства UNIX, архитектуры высокопроизводительных компьютеров, современные технологии параллельного программирования, вопросы использования параллельных алгоритмов для решения типовых задач вычислительной математики и, наконец, применение параллельных вычислений при решении ресурсоемких задач вычислительной гидрогазодинамики и теплообмена.

Накопленный сотрудниками кафедры предыдущий многолетний опыт численного моделирования задач механики жидкости и газа, с учетом идущих от практики

вызовов по решению задач в условиях реальной геометрии и при реальных условиях, предопределил интерес и возможность разработки собственного программного комплекса, отвечающего требованиям к современным вычислительным средствам. В 1993 году, находясь в годичной командировке в Свободном университете Брюсселя, автор данной статьи разработал первую версию программного пакета SINF (Supersonic to Incompressible Flows). С тех пор пакет постоянно развивается усилиями сотрудников, аспирантов и магистрантов кафедры и к настоящему времени находится в ряду известных в мире академических программ вычислительной гидрогазодинамики. Будучи всесторонне протестированным, сегодня программный пакет SINF позволяет моделировать до- и сверхзвуковые стационарные и нестационарные течения, а также тепломассоперенос в областях произвольной геометрии, включая случаи подвижных границ и неинерциальных систем отсчета. В пакете реализован широкий набор параметрических и вихре-разрешающих моделей турбулентности, а также модели течений газозвеси. Численный метод основан на использовании блочно-структурированных сеток, согласованных с границами области течения. Дискретизация пространственных операторов уравнений сохранения выполнена по методу конечных объемов со вторым порядком точности; для получения нестационарных решений реализована неявная трехслойная схема второго порядка точности по физическому времени. Расчеты сложных течений проводятся как на персональных компьютерах, так и на многопроцессорных кластерных системах (собственной и удаленных) посредством организации параллельных вычислений и с использованием сеток, размерность которых достигает десятки миллионов. Распараллеливание осуществлено на основе стратегии декомпозиции расчетной области по блокам сетки, с применением коммуникационной библиотеки MPI. В учебных целях используются упрощенные версии пакета SINF, имеющие развитые пользовательские графические интерфейсы.

Среди самых последних достижений в развитии программного пакета следует отметить разработку и внедрение метода расчета на подвижных деформируемых сектах, что обеспечивает возможность связанного решения задач по сильному взаимодействию потоков с колеблющимися телами и конструкциями, включая формирование турбулентных отрывных зон и их моделирование на основе современных вихре-разрешающих подходов.

Результаты, полученные при работе с пакетом SINF, вошли составной частью в семь кандидатских диссертаций и в два десятка магистерских диссертаций, послужили основой для выполнения двенадцати грантов Российского фонда фундаментальных

исследований, грантов программы поддержки ведущих научных школ, грантов Министерства образования РФ. При выполнении кандидатских и магистерских исследований использование SINF нередко сочетается с применением ведущих лицензионных пакетов, таких как Fluent, Fine/Numeca, Ansys-CFX, CFX Tascflow.

Наиболее полно возможности пакета SINF используются в работах, выполняемых в стенах университета межкафедральной научной группой, объединяющей около двадцати сотрудников и аспирантов кафедры гидроаэродинамики и кафедры теоретических основ теплотехники.

С применением пакета SINF выполнены циклы фундаментальных исследований по ряду актуальных направлений механики жидкости и газа. Среди них:

- исследования в области гидродинамики и теплообмена в полях массовых сил (течения с определяющими эффектами плавучести, закрученные течения, течения вращающейся жидкости, магнитогидродинамические течения);
- численное моделирование автоколебаний тел в потоках;
- исследования аэродинамики и теплообмена в потоках, характерных для проточных частей турбомашин (плоские и пространственные течения в решетках турбинных и компрессорных ступеней, впускные и выпускные тракты и т.п.);
- численное моделирование вентиляционных течений;
- численный анализ конвективных течений в установках выращивания монокристаллов из жидкой фазы.

По результатам этих исследований опубликовано более сотни работ, подготовлены специальные презентационные материалы.

Коллективом упомянутой межкафедральной научной группы выполнен широкий круг прикладных работ по заказам ведущих отечественных (Концерн «Силловые машины» – филиалы ЛМЗ и ЦКТИ, Уральский завод энергетических машин – «Теплоэнергосервис-ЭК», ФГУП «Завод им. В.Я. Климова», «Энерготех», АЭП-СПб и др.) и зарубежных (Отделения Компании Дженерал Электрик – исследовательское, силовые машины и оборудования для нефтегазовой промышленности, Компания Боинг (США, Хьюстон), MTU Aero Engines (Германия), FMC Technologies (Норвегия)) предприятий. В результате этих работ выработаны рекомендации по методикам расчета и проектированию проточных частей паровых турбин и газотурбинных установок, накоплена расчетная база данных и решен ряд вопросов концептуального проектирования нетрадиционных теплообменников, систем вентиляции специальных лабораторных и промышленных помещений, объектов атомной энергетики.