

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ

Я.К. Лоханский



ЛОХАНСКИЙ
Ян Константинович

Кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электротехника, теплотехника, гидравлика и энергетические машины» Московского государственного индустриального университета. Специалист в области экспериментальной и теоретической гидрогазодинамики, численного моделирования, компьютерных технологий инженерного анализа. Автор более 30 научных работ.

Введение

На рубеже XX-XXI вв. техническая оснащённость всех сфер жизнедеятельности человека, интеграция высоких технологий в промышленное производство, в коммерческую деятельность и повседневную жизнь достигла глобальных масштабов. Сформулированная во второй половине XX столетия задача разработки систем автоматизированного проектирования (САПР) к началу XXI столетия трансформировалась в задачу создания **CALS**-технологий (Continuous Acquisition and Life Cycle Support – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла изделий). Одной из составляющих CALS-технологий являются компьютерные технологии инженерного анализа, которые обеспечивают моделирование и анализ рабочих характеристик и конструктивных параметров изделий на этапе их разработки. Проблема скорейшего внедрения компьютерных технологий инженерного анализа в промышленность России и их эффективного использования связана с решением задачи соответствующего информационно-методического и кадрового обеспечения. В данной статье рассматриваются различные аспекты и возможные пути решения этих задач.

От САПР к CALS-технологиям

Для 70-80-х гг. прошлого столетия было характерно нарастающее проникновение вычислительной техники практически во все сферы деятельности человека. Компьютеризация коснулась научной, опытно-конструкторской, производственной, управленческой, финансовой, военной и множества других сфер. Во всех экономически развитых странах интенсивно велись разработки, имеющие целью *использование ЭВМ и их периферийного оборудования в качестве инструментов для выполнения графических работ, проектных расчётов, обработки, систематизации и хранения расчётных и эмпирических данных и справочных материалов, для электронного документирования и управления проектными работами*. В СССР действовали соответствующие государственные и отраслевые научно-технические программы. Перед промышленностью, академическими и отраслевыми НИИ, разработчиками вычислительной техники и математического обеспечения была поставлена задача создания САПР, которая рассматривалась как единый комплекс аппаратно-программных, информационных и математических средств, обеспечивающих повышение качества и уменьшения сроков проектирования [1-7].

К 90-м годам была осуществлена достаточно полная компьютеризация отдельных этапов процесса проектирования и производства изделий промышленности. Задуманная как единый комплекс, САПР распадается на следующие подсистемы, обеспечивающие решение отдельных направлений исходной задачи* [8-18]:

- САПР (CAD – Computer Aided Design);
- АСТПП – автоматизированная система технологической подготовки производства (CAM – Computer Aided Manufacture);
- АСНИ – автоматизированная система научных исследований (CAE – Computer Aided Engineering);

- СУБД – системы управления базами данных, СЭО – системы экспертных оценок (PDM – Product Data Manager);
- АСУП – автоматизированная система управления предприятием (ERP – Enterprise Resources Planning).

В совокупности созданные системы обеспечивали разработку проектной, конструкторской и технологической документации, инженерный анализ проектных характеристик и параметров изделия, хранение, управление поиском, анализ информации, связанной с проектированием и производством изделий, планирование и управление ресурсами предприятия.

От качества технических изделий, их надёжности, соответствия технических характеристик условиям эксплуатации зависит не только благосостояние человека, но и его безопасность. Всё это приводит к пониманию необходимости создания единой информационной системы, обеспечивающей весь жизненный цикл изделия (ЖЦИ), который включает следующие основные этапы:

- проектно-конструкторская разработка;
- технологическая подготовка производства;
- изготовление продукции;
- испытания;
- сертификация;
- эксплуатация;
- утилизация.

Так, сформулированная во второй половине прошлого столетия задача разработки САПР, к началу нынешнего столетия трансформировалась в задачу создания CALS-технологий. Важнейшей особенностью CALS-технологий является не локальная, а интегрированная компьютеризация, обеспеченная единой информационной средой, основанной на электронном документообороте [19].

Идея CALS-технологий зародилась в недрах военно-морского ведомства США и трактовалась как единая стратегия государства и

* В приведенном перечне в скобках указаны системы, созданные за рубежом и выполняющие задачи, аналогичные соответствующим отечественным системам.

промышленности, направленная на преобразование существующих схем производства в единый автоматизированный процесс, охватывающий стадии разработки, производства, эксплуатации и последующей утилизации систем вооружения. В современных условиях CALS-технологии все более широко используются при разработке и производстве сложной наукоемкой продукции, создаваемой интегрированными промышленными структурами, включающими НИИ, КБ, основных подрядчиков, субподрядчиков, поставщиков готовой продукции, потребителей, предприятия технического обслуживания, ремонта и утилизации продукции.

Реализуя идеологию интегрированной компьютеризации и информационного обеспечения всего ЖЦИ, CALS-технологии базируются на описанных подсистемах, являющихся её компонентами и отвечающих тому или иному этапу жизненного цикла.

При этом приходится констатировать, что, поскольку формирование CALS-идеологии и первоначальный период развития составляющих ее компонент приходится на 90-е годы прошлого столетия, в силу известных обстоятельств только немногие предприятия отечественного машиностроения смогли удержаться в соответствующем информационном и технологическом поле. Это, в первую очередь, предприятия авиакосмического комплекса, для которых характерно высокотехнологичное и наукоемкое производство [19]. Сегодня перед возрождающейся отечественной промышленностью стоит задача достижения мирового уровня информационного и технологического обеспечения на всех этапах ЖЦИ, освоение опыта передовых отечественных и зарубежных предприятий и, наконец, перехода к этапу активного участия в формировании современных информационных технологий проектной и производственной деятельности. Только в случае успешного решения этой задачи возможно дальнейшее развитие отечественной промышленности.

Компьютерные технологии как инструмент инженерного анализа

Началом ЖЦИ является этап проектно-конструкторской разработки изделия. На этом этапе важное значение имеют работы, связанные с моделированием и инженерным анализом рабочих характеристик и конструктивных параметров изделий.

Удовлетворение все более возрастающих требований к техническим характеристикам изделий, их экономичности, техногенной и экологической безопасности и другим характеристикам возможно только на основе использования *наиболее полных физических и математических моделей*. Это модели, описывающие процессы, связанные с нагружением и деформацией сложных конструкций, с движением жидких и газобразных сред, с тепломассообменом, с химическими реакциями, излучением, воздействием на вещество электродинамических сил и др. Как известно, такие процессы в общем случае описываются нелинейными системами дифференциальных уравнений в частных производных. Решение таких уравнений в полной постановке возможно только на основе методов численного моделирования.

Реализацию методов вычислительной механики в целях решения прикладных задач при разработке технических изделий на основе использования высокопроизводительной вычислительной техники, обеспечивают **компьютерные технологии инженерного анализа**, которые являются частью единой информационной системы, реализующей CALS-технологии.

В основе компьютерных технологий инженерного анализа наряду с методами математического моделирования лежит обеспеченность современной вычислительной техники мощными графическими приложениями, а также возможность работы в мультипрограммном режиме. Такие возможности позволяют разрабатывать программные оболочки и «дружелюбный» пользователю интерфейс, которые обеспечивают независимое управление про-

цессом создания моделей, ходом вычислений, обработкой и анализом получаемых результатов. Таким образом, программные продукты, реализующие компьютерные технологии инженерного анализа, становятся инструментом, которым независимо от разработчика может воспользоваться любой соответствующим образом подготовленный специалист.

Можно дать следующее определение компьютерным технологиям инженерного анализа: *это программные продукты «тяжелого класса», которые основаны на численной реализации с помощью высокопроизводительной вычислительной техники наиболее полных физических и математических моделей, описывающих изучаемые процессы, обеспеченные дружественным интерфейсом, позволяющим независимо от разработчика управлять созданием модели, процессом расчета, обработки и анализа полученных результатов.*

Арсенал традиционных инструментов, используемых инженером в своей деятельности, включает точные или приближенные математические методы, полуэмпирические методики, экспериментальные стенды и установки. Каждый из этих инструментов обладает различными качествами, позволяющими использовать их на соответствующих этапах при разработке изделия и определения его параметров и рабочих характеристик. Компьютерные технологии инженерного анализа, основанные на численном моделировании процессов, ни в коей мере не заменяют какой-либо из этих инструментов или всей их совокупности. Они являются лишь одним из этих инструментов и имеют свои специфические свойства, определяющие наиболее целесообразное место и способ их использования в процессе создания новых изделий.

При создании нового изделия на первом этапе решается задача определения облика изделия, отвечающего требованиям технического задания. На этом этапе для оценки характеристик изделия обычно используются различные экспресс-методы, основанные на приближенных полуэмпирических методиках или точ-

ных соотношениях, в тех случаях, когда это возможно.

Основной объем работ по созданию изделия приходится на его доводку, испытания на стендах, поиск новых технических решений и их апробацию. Именно на этом этапе использование компьютерных технологий инженерного анализа может дать наибольший эффект. В первую очередь это связано с тем, что такие технологии фактически позволяют создавать виртуальные стенды и проводить многопараметрические испытания. При проведении таких виртуальных испытаний, или, другими словами, вычислительного эксперимента, определяются необходимые зависимости интегральных характеристик изделий от их конструктивных и других определяющих параметров. Получаемая при этом информация о характере и физических особенностях протекающих процессов дает неоценимую возможность анализа причин того или иного поведения характеристик изделия. Это, в свою очередь, позволяет осознано выбирать направление поиска технических решений и оптимальных значений определяющих параметров.

Окончательная оценка принятых решений и определение соответствия характеристик разработанного изделия требованиям технического задания осуществляется на основе стендовых и натурных испытаний.

Таким образом, использование компьютерных технологий инженерного анализа позволяет существенно сократить требуемый объем таких испытаний. Например, известно, что одним из этапов оценки характеристик безопасности и надежности изделий являются краш-тесты. Проведение виртуальных краш-тестов позволяет в несколько раз сократить количество натурных изделий, подлежащих таким испытаниям. Кроме того, виртуальные испытания с помощью компьютерных технологий инженерного анализа дают практически полную информацию о распределении и динамике напряжений и деформаций в конструкции испытуемого изделия. Более того, компьютерные технологии позволяют моделировать такие условия

работы изделия, которые по тем или иным причинам невозможно создать на экспериментальных стендах и установках.

В то же время, при использовании численных методов, лежащих в основе компьютерных технологий инженерного анализа, необходимо учитывать, что реальные процессы при этом лишь моделируются с той или иной степенью достоверности. Поэтому важнейшими условиями вычислительного эксперимента являются корректность постановки задачи и формирования адекватной модели, а также тщательный анализ и интерпретация получаемых решений, выделение практически значимых и обоснованных результатов, учёт поправок на ошибки, определяемые свойствами численного решения.

Следует отметить, что любой способ математического или физического моделирования реальных процессов вносит свои искажения в получаемые решения, которые необходимо учитывать при использовании результатов в практических целях. Например, определение аэродинамических характеристик изделия, установленного в аэродинамической трубе на донной державке, всегда связано с необходимостью учёта поправки на донное давление [20]. Любой другой способ крепления модели в аэродинамической трубе, оснащение модели различными датчиками также вносят свои искажения в получаемые результаты. Учет этих искажений обязателен при анализе и практическом использовании экспериментальных данных.

Рассматривая компьютерные технологии инженерного анализа как один из инструментов для разработки технических изделий, важно отметить, что использование этих технологий не изменяет классическую схему решения инженерных задач. Использование этого инструмента должно осуществляться в рамках традиционного инженерного подхода. Такой инженерный подход предполагает, в первую очередь, согласование целей и средств решения задачи.

Например, при моделировании течения в центробежных насосах возникает проблема передачи данных между расчетной областью,

связанной с вращающимся рабочим колесом, и неподвижной проточной частью направляющего аппарата. В пакете прикладных программ гидрогазодинамического анализа STAR-CD [21] предусмотрена возможность постановки внутренних граничных условий типа «скользящая сетка», которые обеспечивают передачу данных на сеточном уровне. Однако такой подход требует недоступных в условиях проектного подразделения среднего уровня вычислительных ресурсов и временных затрат. Если при этом не требуется определять локальные пульсационные характеристики течения, а задача состоит в определении интегральных выходных параметров по расходу и гидравлическим потерям, вполне оправданным представляется подход, использованный авторами работы [22]. Согласно этому подходу задача решается в стационарной постановке. При этом для обеспечения интерфейса между расчётной сеткой, связанной с рабочим колесом ступени, и расчётной сеткой, связанной с направляющим аппаратом, использована технология множественных систем координат, имеющих различные угловые скорости. При расчете сборки из нескольких ступеней на входе в каждую последующую ступень вводилась эффективная закрутка потока – равномерная по всему поперечному сечению в тангенциальном направлении, которая определялась из расчета предыдущей ступени после осреднения характеристик потока в выходном сечении.

Инженерный подход предполагает использование и других принципов, способствующих получению практически значимых результатов с помощью доступных и эффективных средств. Один из них – модульный принцип, заключающийся в раздельном анализе разномасштабных по геометрическим и временным параметрам процессов. При этом результаты параметрических расчетных исследований мелкомасштабных процессов могут служить в качестве граничных условий для решения крупномасштабного модуля задачи.

Компьютерные технологии представляют собой мощное средство математического мо-

делирования при решении инженерных задач. Однако это не значит, что нажатием на кнопку «ОК» можно решить все проблемы. Напротив, формирование **компьютерных моделей** требует очень тщательной предварительной проработки и корректного подхода к определению параметров этой модели (например, топология разностной сетки, свойства и реология среды, граничные условия, параметры разностной схемы и алгоритма решения и др.). Такой предварительный поиск может осуществляться на основании расчетов, проводимых в рамках полумпирических методик, анализа известных экспериментальных данных и т.п. Кроме того, важнейшее значение имеет интерпретация полученных решений, их анализ и определение необходимых поправок, позволяющих исключить искажения, вносимые самим инструментом, и, тем самым, выделить результаты, имеющих прикладное значение.

Таким образом, можно констатировать, что *компьютерные технологии инженерного анализа – это мощный инструмент, занимающий своё место в ряду других традиционных инструментов теоретического и экспериментального характера, использование которого в рамках общего инженерного подхода к решению прикладных задач позволяет существенно сократить потребный объём дорогостоящих стендовых и натурных испытаний и одновременно обеспечивает глубокий анализ протекающих процессов и рабочих характеристик, а, следовательно, высокое качество разрабатываемых изделий.*

Моделирование изучаемых процессов с использованием методов вычислительной механики в специализированной литературе принято обозначать термином «численное моделирование». Пакеты программ, реализующие компьютерные технологии инженерного анализа, согласно приведенному определению, наряду с собственно численным моделированием включают весь комплекс программного обеспечения для формирования вычислительной модели, проведения вычислительного эксперимента, обработки и анализа данных. Это допускает ис-

пользование термина «компьютерное моделирование», обозначающего осуществление моделирования в программной среде, реализующей компьютерные технологии инженерного анализа.

Проблемы подготовки кадров и методического обеспечения

В 70-80-е годы XX в. отечественными учеными был создан широкий спектр программных комплексов, обеспечивающих численное моделирование сложных физических, химических и механических процессов. Например, в работе [23] дан достаточно полный обзор таких разработок в области аэрогидродинамики и тепло-массообмена. Однако известные события конца 80-90-х годов прошлого века привели к свертыванию многих работ в этом направлении. В то же время создание программного продукта соответствующего класса требует затрат трудовых ресурсов, исчисляемых сотнями человеко-лет. В результате, к концу последнего десятилетия прошлого века, когда в России начали возрождаться отдельные предприятия и отрасли промышленности, и современные требования к разрабатываемым изделиям заставили обратиться к компьютерным технологиям проектирования и инженерного анализа, рынок предложений был, в основном, насыщен зарубежными программными продуктами. Информация же об отечественных программных продуктах в силу недостаточности средств у разработчиков на проведение необходимых маркетинговых мероприятий была недоступна широкому кругу промышленных предприятий.

Таким образом, промышленность России, ее специалисты в основной массе не были готовы к эффективному использованию этих современных мощных инструментов инженерного анализа в реальном производственном процессе. Работа с таким инструментом требует соответствующего уровня фундаментальной подготовки, как в предметной области, так и в области вычислительной механики. Подавляющее же большинство высших образовательных учреж-

дений, осуществляющих подготовку специалистов по машиностроительным специальностям и направлениям инженерно-технического профиля, до последнего времени строили свои учебные планы и рабочие программы по учебным дисциплинам на основе традиционных подходов, нередко предполагающих освоение классических полуэмпирических методик.

В результате в промышленности России возник существенный разрыв между необходимым и реальным уровнем подготовки пользователей таких программных продуктов. В этих условиях эффективное использование возможностей такого класса программных продуктов оказалось весьма проблематичным.

Представляется, что проблема скорейшего внедрения и эффективного использования компьютерных технологий инженерного анализа в промышленности России требует решения следующих задач.

Во-первых, это **задача информационно-методического обеспечения**, которая предполагает формирование информационной среды, обеспечивающей возможность обобщения и систематизации методического опыта, накапливаемого различными пользователями компьютерных технологий инженерного анализа при решении реальных производственных задач, а также обмена соответствующей информацией сообщества пользователей.

Во-вторых, **задача кадрового обеспечения**. Эта задача связана с подготовкой инженерных кадров, в полной мере освоивших компьютерные технологии инженерного анализа и эффективно использующих этот мощный инструмент в своей производственной деятельности. При этом, с одной стороны, необходима организация системы повышения квалификации на действующем производстве, а, с другой стороны, организация такой системы подготовки в учреждениях высшего профессионального образования, которая обеспечит выпуск инженерных кадров, обладающих необходимым уровнем знаний и владеющих современными технологиями проектирования и анализа.

Традиционные формы информационно-методического обеспечения связаны с обменом научно-технической и методической информацией при проведении семинаров, конференций, симпозиумов, а также через публикации, как отдельных изданий, так и в периодической печати.

Сегодня в качестве центров, обеспечивающих информационную поддержку компьютерных технологий инженерного анализа, в основном выступают фирмы, которые занимаются разработкой и продвижением программных продуктов подобного класса. Мероприятия, проводимые такими фирмами, имея целью проинформировать пользователей о направлениях развития и достижениях конкретных программных продуктов, оказываются весьма полезными с точки зрения рассматриваемой задачи информационно-методического обеспечения. Однако круг вопросов, инициируемых такими фирмами, ограничен проблемами, связанными с использованием программных продуктов, составляющих коммерческий интерес данной фирмы. Нас же интересует более широкое информационно-методическое обеспечение, поэтому целесообразно, чтобы методические центры базировались в академических или образовательных учреждениях.

Положительный опыт работы такого центра накоплен в «Центре компьютерных технологий в механике», созданном в 2000 г. в Институте механики МГУ. Первый же семинар, организованный на базе этого центра в 2000 г. по теме «Методические вопросы использования компьютерных технологий в промышленности и образовании», вызвал широкий интерес. В нём приняли участие около 100 представителей промышленных предприятий и образовательных учреждений из 23 городов России. Участники семинара, проходившего в Институте механики МГУ в апреле 2005 г., приняли решение о необходимости придания ему статуса ежегодного, на котором будут рассматриваться вопросы методического обеспечения и поддержки компьютерных технологий инженерного анализа. Организаторами этого семинара

были Институт механики МГУ, Московский государственный индустриальный университет и компания «Саровские лаборатории».

Вполне очевидно, что и публикации, касающиеся рассматриваемого вопроса, целесообразно концентрировать в ограниченном числе периодических изданий, например, в журнале «Машиностроение и инженерное образование», так как рассматриваемые вопросы вполне соответствуют целям и духу данного издания.

Во многих учреждениях высшего образования России, осуществляющих подготовку по машиностроительным специальностям и направлениям инженерно-технического профиля, ведётся подготовка специалистов, обладающих необходимым уровнем фундаментальных знаний и владеющих навыками работы в среде компьютерных технологий инженерного анализа. Среди них можно назвать Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Московский государственный индустриальный университет, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Балтийский государственный технический университет, Самарский государственный аэрокосмический университет, Красноярский государственный технический университет и др. Однако этот процесс носит локальный характер. Зачастую это происходит на уровне индивидуальной работы со студентами там, где преподаватель-подвижник заинтересовал любознательного студента. При этом полностью отсутствует информация об учебно-методическом обеспечении таких занятий. Можно с высокой степенью уверенности утверждать, что первый случай обмена учебно-методическим опытом по компьютерным технологиям инженерного анализа состоялся на упомянутом семинаре в апреле 2005 г. в Институте механики МГУ.

Таким образом, весьма актуальна задача включения в образовательный процесс в учреждениях высшего образования машиностроительного профиля *системной подготовки специалистов* в целях обучения работе в среде компьютерных технологий инженерного анализа. Одним из принципов, лежащих в основе

системы подготовки специалистов, является принцип сквозной реализации поставленной задачи в учебных планах и согласования рабочих программ по соответствующим дисциплинам. С этой целью при изучении дисциплин, предшествующих основной дисциплине, необходимо вводить элементы, обеспечивающие подготовку слушателей к восприятию основного материала по данному направлению. В смежных дисциплинах необходимо вводить элементы, предполагающие использование знаний, получаемых в основной дисциплине. При формировании планов и тем курсовых работ, курсовых проектов, выпускных квалификационных работ необходимо предусматривать использование соответствующих знаний и приобретение опыта применения их для решения формулируемых задач.

Например, слушатель, которому предстоит научиться работать в среде компьютерных технологий инженерного анализа в первую очередь должен обладать знаниями в предметной области. Поскольку основу компьютерных технологий инженерного анализа составляют методы численного моделирования, необходимым условием является также наличие знаний в области основ вычислительной механики. Чтобы «чувствовать» ход решения задачи необходимо быть знакомым с основами программирования. Более того, программные комплексы, реализующие компьютерные технологии инженерного анализа, предусматривают возможность пользовательского программирования. Предполагая получение опыта решения прикладных задач, обязательно нужно предусмотреть умение работать с CAD/CAE интерфейсом для приобретения навыков решения задач применительно к реальным изделиям. Весьма существенным фактором служат знания о подходах к анализу технической проблемы и разработке стратегии ее решения, а также собственно о технологии проведения вычислительного эксперимента.

Исходя из изложенного выше определим основные черты некоторых пунктов учебного плана.

Начнем, следуя существующему порядку построения учебного плана, с общих математических и естественнонаучных дисциплин, в первую очередь с математики и информатики.

При формировании рабочих программ по математике следует обратить внимание на разделы, связанные с итерационными методами решения систем линейных уравнений, с основами построения разностных схем и их свойствами (аппроксимация, устойчивость, сходимость и др.). Целесообразно при изложении материала по методам решения систем линейных уравнений наряду с классическими методами дать представление о таких современных методах, как метод сопряжённых градиентов и др.

В курсах информатики должны быть разделы, посвящённые алгоритмическим языкам программирования. Причем важно показать в этом курсе, что принципиальна логика программирования, а не знания синтаксиса конкретного языка, а также, что владение более чем одним языком программирования не должно представлять собой исключение, а должно являться нормой. Кроме того, целесообразно определённое согласование между курсами математики и информатики. Такое согласование должно предусматривать выполнение самостоятельных или курсовых работ в рамках этих курсов, в которых необходимо программными средствами реализовать, например, какой-либо метод решения систем линейных уравнений и т.п.

Целесообразно также более широкое использование средств программирования при выполнении самостоятельных или курсовых работ в других курсах естественнонаучного цикла, например, в курсах теоретической механики и термодинамики.

Развитие знаний и навыков в области численных методов и программирования возможно в рамках специального курса, предусматривающего более подробное изучение методов вычислительной механики, который можно включить в циклы математических и естественнонаучных или общепрофессиональных

дисциплин. В отличие от аналогичных курсов, читаемых, например, на механико-математических факультетах классических университетов, где студенты приобретают знания, позволяющие им разрабатывать разностные схемы и алгоритмы решения нелинейных систем дифференциальных уравнений в частных производных, цель предлагаемого курса состоит в ознакомлении студентов с общими принципами построения разностных схем, свойствами разностных решений и способами управления этими свойствами. Кроме того, программа такого курса должна предусматривать обязательное знакомство с современными методами и алгоритмами в вычислительной механике. Например, с методом контрольного объема и SIMPLE-подобными алгоритмами в вычислительной гидромеханике или с методом конечных элементов в механике твердого деформируемого тела.

Изложение базовой дисциплины должно быть построено таким образом, чтобы можно было показать особенности постановки задач, рассматриваемых этой дисциплиной, и способов их решения при использовании различных методов, в том числе и на основе компьютерных технологий.

Основной курс, в котором излагаются положения и методы компьютерных технологий инженерного анализа должен основываться на том опыте, который накоплен на данный момент при практическом решении прикладных задач. В этом курсе должно быть показано место компьютерных технологий в ряду других инструментов решения промышленных задач, принципы работы программных комплексов, реализующих компьютерные технологии инженерного анализа, интерфейс с CAD-системами, методы и подходы к решению задач на основе компьютерного моделирования, технология проведения вычислительного эксперимента, особенности интерпретации и анализа полученных результатов. В рамках этого курса должно быть предусмотрено достаточно времени для лабораторного компьютерного практикума и для самостоятельной работы.

Вопрос выбора базового программного комплекса на данном этапе в основном будет определяться, очевидно, финансовыми возможностями данного образовательного учреждения. Выбор базового пакета программ не принципиален. Главное требование, предъявляемое к базовому пакету программ, состоит в том, что он должен содержать все необходимые компоненты компьютерных технологий инженерного анализа. Такой пакет программ должен иметь:

- программу-препроцессор для формирования расчётной модели, как в режиме графического интерфейса, так и в командном режиме, а также для обработки и анализа полученных результатов;
- развитую структуру файлов, формируемых в процессе работы программ, в которых содержится необходимая для анализа информация о ходе формирования модели и о ходе вычислительного процесса при работе программы решателя;
- встроенный сеточный генератор и (или) интерфейс к внешним сеточным генераторам;
- интерфейс к прикладным программным системам трехмерного проектирования;
- интерфейс к внешним программам, предназначенным для графической интерпретации трехмерных полей распределённых параметров.

Кроме того, желательно, чтобы базовый пакет программ реально использовался промышленными предприятиями в своей производственной деятельности. Важно отметить, что структура и принципы функционирования различных программных комплексов, реализующих компьютерные технологии инженерного анализа, схожи. Поэтому освоение альтернативного программного продукта того же класса при условии получения навыков работы с каким-либо из таких комплексов требует вполне разумных временных затрат.

Знания и навыки работы в среде какого-либо пакета программ, реализующего компьютерные технологии инженерного анализа, полученные слушателями в соответствии с изложенным учебным планом, являются первич-

ными. Они позволяют ориентироваться в возможностях таких технологий и принципах их работы. Слушатели, выполнившие такой учебный план, при желании могут пройти углублённую подготовку и использовать компьютерные технологии при выполнении выпускных квалификационных работ. В тех случаях, когда темы таких работ согласованы или предложены непосредственно промышленными предприятиями, их успешное выполнение может обеспечить молодому специалисту вполне подходящий контракт на выгодных условиях.

Изложенные положения и принципы используются при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Энергомашиностроение» на кафедре «Электротехника, теплотехника, гидравлика и энергетические машины» Московского государственного индустриального университета. На кафедре уже имеется некоторый опыт использования в учебном и научном процессе компьютерных технологий инженерного анализа. Например, в рамках выполнения одной из магистерских диссертаций рассматривается задача об эволюции вертикальной струи тяжелой вязкой проводящей жидкости, возникающей в результате импульсного комплексного силового лазерного и электромагнитного воздействия на нее с заданной частотой [24]. Струя вытекает из канала прямоугольного сечения $b \times h$ в направлении Y и претерпевает одностороннее импульсное воздействие (рис. 1).

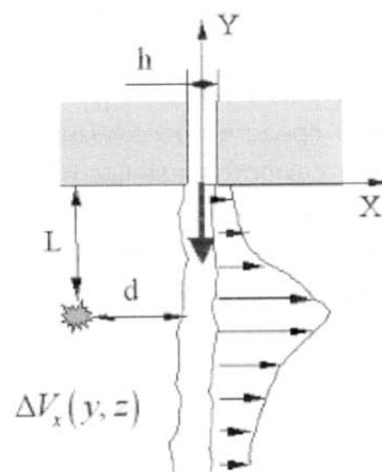


Рис. 1. Схема силового воздействия на струю жидкости

Эюра приращения компоненты скорости
жидкости ΔV_x (м/с) в результате импульсного
воздействия описывается выражением:

$$\Delta V_x = \frac{0,53}{\left[1 + 0,44 \cdot 10^6 \cdot \left[\left(\frac{L}{d} + \frac{y}{d}\right)^2 + \left(\frac{z}{d}\right)^2\right]\right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{6,36}{\left[1 + 0,44 \cdot 10^8 \cdot \left[\left(\frac{L}{d} + \frac{y}{d}\right)^2 + \left(\frac{z}{d}\right)^2\right]\right]^{\frac{3}{2}}} + \begin{cases} 0,67, & -L < y < 0 \\ 0, & y < -L \end{cases},$$

где L – расстояние от выходного сечения канала до точечного источника импульсного воздействия; d – расстояние от источника до поверхности струи.

Задача решается в среде пакета прикладных программ STAR-CD. Форма фрагмента струи, вытекающей из канала ($b = 3$ мм, $h = 0,2$ мм) со скоростью $V = 30$ м/с, после четырнадцатикратного импульсного воздействия с частотой $f = 10$ кГц показана на рис. 2. Хорошо видно наложение «ступенчатой» деформации, вызванной импульсным воздействием Лоренцевой силы по всей ширине струи, и локальных деформаций, образованных в результате точечного лазерного импульсного воздействия.

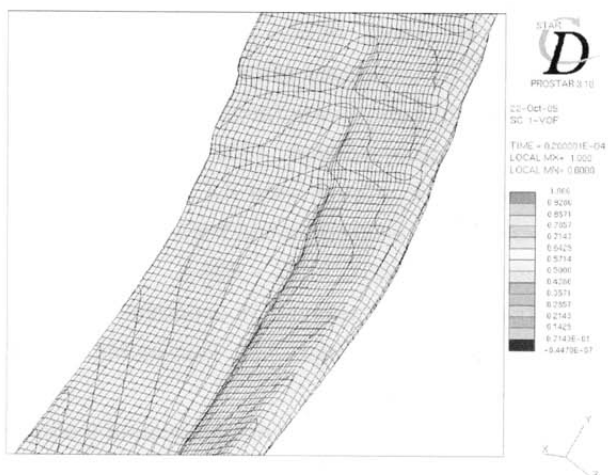


Рис. 2. Форма струи жидкости в результате комплексного импульсного воздействия

Другой пример связан с исследованием характеристик центробежного насоса, проводимым магистрантом кафедры и в настоящее время продолжается им уже в качестве аспиранта в рамках подготовки кандидатской диссертации. Работа посвящена исследованию зависимости рабочих характеристик центробежного одноступенчатого насоса от числа Рейнольдса. Исследования проводятся на модели с внешним диаметром рабочего колеса $D = 97,5$ мм и отводным каналом улиточного типа. Течение жидкости в проточной части насоса моделируется в среде пакета программ STAR-CD в трехмерной постановке. Полная модель включает 650 тыс. контрольных объемов. На рис. 3 приведен фрагмент сеточной модели проточной части исследуемого насоса [25]. Показаны часть кольцевого канала, через который осуществляется осевой подвод жидкости, межлопаточные каналы, спиральный отвод и диффузор.

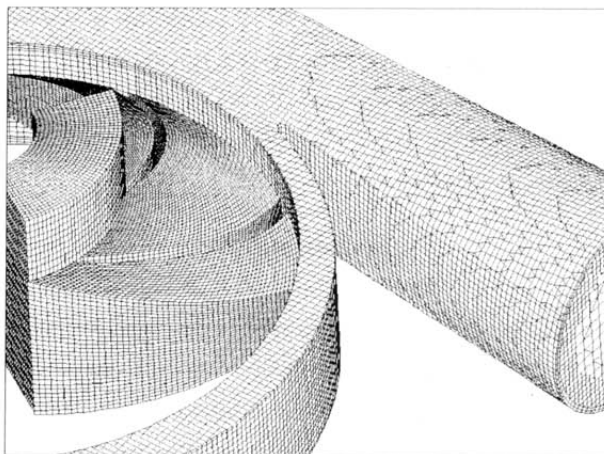


Рис. 3. Фрагмент сеточной модели проточной части центробежного насоса

Построенная модель позволяет достаточно подробно анализировать поле течения жидкости в проточной части модели. Расчеты проводились в рамках модели турбулентного течения. На рис. 4 приведен пример распределения давления в срединном сечении проточной части насоса, полученного при частоте вращения вала $n = 15000$ об/мин и подаче

$Q = 10$ л/с. Интегрирование распределенных сил по поверхности рабочего колеса позволяет получить рабочие характеристики насоса.

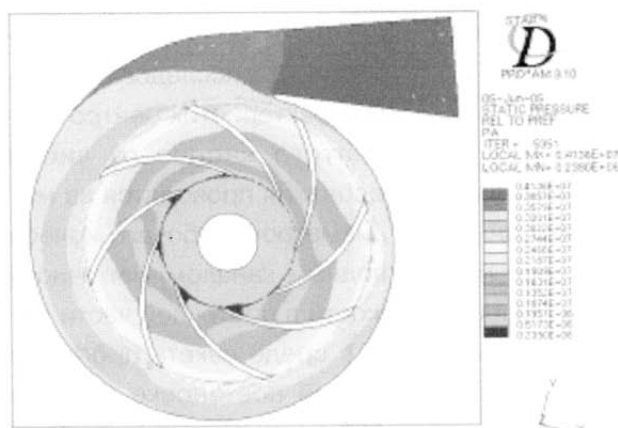


Рис. 4. Поле давления в сечении
проточной части насоса

Отметим, что наряду с опытом применения компьютерных технологий инженерного анализа в учебном процессе в Московском государственном индустриальном университете и в Институте механики МГУ имеется и положительный опыт организации программы повышения квалификации по теме «Компьютерные технологии инженерного анализа» для работников промышленных предприятий.

Заключение

Компьютерные технологии инженерного анализа являются мощным инструментом решения прикладных задач. Использование такого инструмента наряду с другими теоретическими и экспериментальными методами исследования позволяют решать сложные задачи, возникающие при разработке технических изделий.

В то же время для эффективного использования такого инструмента необходимо соответствующее методическое обеспечение, а также создание системы подготовки специалистов, обладающих соответствующим уровнем знаний и навыками работы.

Для решения рассмотренных в статье проблем автор приглашает к сотрудничеству пред-

ставителей промышленных предприятий и учреждений высшего образования, а также всех заинтересованных лиц.

Список литературы

1. Биргер И. А. Основы автоматизированного проектирования // Изв. вузов. Машиностроение. 1977. № 8. С. 32-35.
2. Мишин В.П., Осин М.И. Введение в машинное проектирование летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1978. – 128 с.
3. Автоматизация поискового проектирования / Под ред. А.И. Половинкина. – М.: Радио и связь, 1981. – 344 с.
4. Петренко А.И. Основы автоматизированного проектирования. – Киев: Техніка, 1982. – 295 с.
5. Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении / Под. общ. ред. Н.М. Капустина. – М.: Машиностроение, 1985. – 304 с.
6. Федосов Е.А. Автоматизация проектирования сложных технических систем // Вестник АН СССР. 1986. № 10. С. 40-49.
7. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
8. Кузьмичев Д.А., Радкевич И.А., Смирнов А.Д. Автоматизация экспериментальных исследований. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
9. Ступин Ю.В. Методы автоматизации физических экспериментов и установок на основе ЭВМ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 288 с.
10. Певчев Ю.Ф., Финогенов К.Г. Автоматизация физического эксперимента: Учеб. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 234 с.
11. Автоматизация научных исследований / Под. ред. А.Г. Свешникова. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 174 с.
12. Автоматизация научных исследований в области машиноведения // Сб. тр. АН СССР. Институт машиноведения им. А. А. Благонравова / Отв. ред. Бруевич Н.Г., Сергеев В.И. – М.: Наука, 1983. – 166 с.

13. Организация прикладных научно-исследовательских работ в аэрокосмическом комплексе США: Техническая информация УкрНИИАТ / Под. ред. Г.А. Кривова. – Киев: УкрНИИАТ, 1999. – 45 с.
14. Харафас Д., Легг С. Конструкторские базы данных: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.
15. Брук Б.Н., Бурков В.Н. Методы экспертных оценок в задачах упорядочения объектов // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1972. № 3. С. 29-39.
16. Бортников Ю.А., Сухарев В.И. Методические вопросы выработки решения при сравнении и выборе вариантов в процессе проектирования / Под ред. А.Ф. Федосеева. – М.: Машиностроение, 1978. – 72 с.
17. Технологическая подготовка гибких производственных систем / Под. общ. ред. С.П. Митрофанова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
18. Злыгарев В.А., Самсонов О.С. Информационные системы конструкторско-технологической подготовки производства авиакосмической техники // Авиационная промышленность. 2000. № 1. С. 17-25.
19. CALS (Continuous Acquisition and Life Cycle Support – непрерывная информационная поддержка жизненного цикла изделия) в авиастроении / Научн. ред. А.Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 676 с.
20. Швец А.И., Швец И.Т. Газодинамика ближнего следа. – Киев: Наукова думка, 1976. – 383 с.
21. Methodology STAR-CD VERSION 3.10. – London: Computational Dynamics Limited, 1999. – 476 p.
22. Гувернюк С.В., Лоханский Я.К., Скибин А.П., Шишов А.В. Стационарный расчет рабочих процессов в сборке из ступеней центробежного погружного насоса: Отчет № 4725. – Институт механики МГУ, 2004. – 56 с.
23. Приходько А.А. Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене. – Киев: Наукова думка, 2003. – 380 с.
24. Взаимодействие тонкой плоской струи с периодическими возмущениями / В.О. Герман, П.В. Козлов, Я.К. Лоханский, О.Э. Мельник, А.В. Мурашов // Тез. докл. науч. конф. «Ломоносовские чтения» (г. Москва, 18-26 апреля 2005 г.). – М.: Изд-во МГУ, 2005. С. 34-35.
25. Шейпак А. А., Ярославцев А. В. Оценка влияния вязкости жидкости на характеристику центробежного насоса // Тр. III Межд. науч.-техн. конф. «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» (СПб., 7-9 июня 2005 г.). СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2005. С. 133.