



Использование программного комплекса FlowVision при расчете элементов проточной части турбокомпрессоров в ОАО «СКБТ»

Вадим Мельников, Андрей Прокусов

ОАО «Специальное конструкторское бюро турбоагрегатов» (ОАО «СКБТ») уже более 40 лет разрабатывает и производит турбокомпрессоры (ТК), служащие агрегатами наддува для двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

За это время было создано более 60 модификаций ТК для двигателей различного назначения мощностью от 450 до 4000 л.с. Принципиальная конструктивная схема турбокомпрессора типа ТК41 для дизель-генератора магистрального тепловоза представлена на рис. 1. Общее количество турбокомпрессоров, выпущенных по разработкам ОАО «СКБТ», превысило 150 тыс.

Рабочий процесс в проточных частях компрессоров и турбин ТК характеризуется сложным трехмерным, а во многих случаях и нестационарным течением рабочего тела (воздуха и продуктов сгорания), связанным как с геометрией проточной части турбокомпрессора, так и с особенностями компоновки и рабочего процесса двигателя.

При проектировании турбокомпрессора основной задачей является получение газодинамических характеристик потока рабочего тела, обеспечивающих удовлетворительную работу турбокомпрессора совместно с двигателем во

всем рабочем диапазоне последнего с достаточно высоким коэффициентом полезного действия (КПД). Это достигается соответствующим выбором геометрии элементов проточной части компрессора и турбины ТК.

Традиционно сложившийся подход к проектированию ТК выглядит следующим образом:

1. Используя известные и описанные в литературе¹ методики, производится газодинамический расчет компрессора и турбины для новой или модернизируемой проточной части ТК, исходя из необходимых значений расхода рабочего тела, степени повышения давления и некоторых других требований, обусловленных особенностями данного типа ДВС. На базе этого расчета производят профилирование (подбор) геометрии проточной части ТК.
2. Далее следуют этап разработки и изготовления экспериментальных или опытно-промышленных образцов, получение стеновых рабочих характеристик в составе ТК или в составе экспериментальных отсеков, корректировка проточной части компрессора и турбины по результатам стеновых испытаний.

В.В. Мельников

Заместитель начальника конструкторского отдела, ОАО «Специальное конструкторское бюро турбоагрегатов».

А.А. Прокусов

Начальник отдела прочности и САПР, ОАО «Специальное конструкторское бюро турбоагрегатов».

3. Заключительными этапами доводки проточной части ТК являются испытания его в составе ДВС и возможные повторные доработки проточной части.

Обобщая имеющийся опыт, можно условно разделить задачи, встречающиеся при проектировании ТК, на две группы:

- создание новой модификации ТК с удельными рабочими параметрами в пределах, уже достигнутых на других модификациях. В этом случае работы сводятся к агрегатированию уже имеющихся вариантов проточных частей с незначительной коррекцией их геометрических параметров в пределах, определенных практикой оптимальных зон. Подобные задачи являются достаточно хорошо отработанными и обычно не вызывают принципиальных затруднений;
- создание новых модификаций турбокомпрессоров с рабочими параметрами (степень повышения давления, КПД, ширина рабочей характеристики и др.), превышающими серийно достигнутый предприятием уровень. В подобных случаях обычно приходится решать целый комплекс взаимосвязанных газодинамических, прочностных, конструктивных и технологических проблем, что практически всегда вызывает значительные затруднения. Однако именно способность предприятия-разработчика решать подобные задачи — выйти на новый технический уровень с минимальными временными затратами и материальными издержками — и определять его состоятельность и успех.

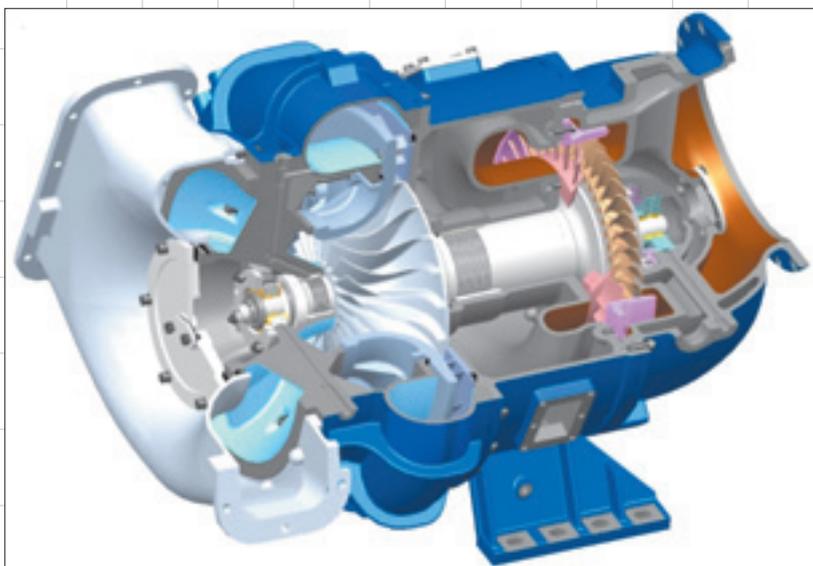


Рис. 1. Конструктивная схема турбокомпрессора ТК41

¹ Теория двигателей внутреннего сгорания/ Под ред. Н.Х.Дьяченко. Л.: Машиностроение, 1974.



В целях изучения возможности снижения времени и затрат на разработку и доводку новых проточных частей для перспективных турбокомпрессоров в 2002 году в СКБТ была начата пробная эксплуатация программного комплекса FlowVision. Работы проводились при активной поддержке разработчика данного продукта — инженеринговой компании «ТЕСИС».

Естественно, на начальном этапе возникла необходимость в проведении верификации программного комплекса и в отработке методик для решения типовых задач по расчетам элементов проточных частей ТК (турбин и компрессоров).

Объектом работ по верификации послужила проточная часть компрессора ТК23Н-06. Данный турбокомпрессор был разработан в ОАО «СКБТ» для наддува дизеля 6ЧН25/34 мощностью 330 кВт (450 л.с.). Компрессор ТК состоит из входника (входного канала), колеса компрессора полуоткрытого типа, безлопаточного конического диффузора и профилированного воздухосборника (улитки). Схема проточной части и замеров при стендовых испытаниях компрессора приведена на рис. 2.

Целью расчета являлось получение с помощью FlowVision виртуальной ветки характеристики компрессора (зависимости степени повышения давления в компрессоре от массового расхода

воздуха, приведенного к нормальным атмосферным условиям, при заданной частоте вращения ротора) и сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, а также оценка аппаратных средств и машинного времени, необходимого для подобного расчета.

Для расчета при помощи программного комплекса SolidWorks были построены (рис. 3):

- цельная модель проточной части, так как имеющийся опыт свидетельствует о существенно неосесимметричном характере потока в турбомашине подобного типа;
- секторная модель проточной части ТК, представляющая собой 1/16 часть (по числу лопаток колеса компрессора) полной модели без ребер во входнике и с осесимметричным кольцевым выходным участком вместо улитки компрессора. Расчетная модель компрессора состоит из таких подобластей, как входник, колесо компрессора и диффузор.

Расчет производился во всех случаях (в секторной и полной постановке) с использованием модели полностью сжимаемой жидкости и стандартной модели зазора. Расстановка граничных условий (ГУ) в расчетных под областях принципиально соответствует описанному далее для задач с лопаточными диффузорами. Сечения граничных условий на входе во входник и на выходе

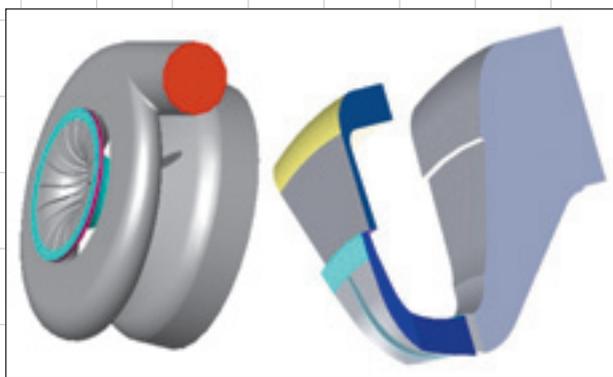


Рис. 3. Полная (слева) и секторная (справа) модели проточной

из улитки соответствуют сечению замера давления и температуры в реальном эксперименте.

Расчет производился с использованием версии FlowVision 2003+PR12 Build07.06.03 на компьютере Pentium 4 с частотой 2,6 ГГц и оперативной памятью 1 Гбайт в операционной системе Windows XP. На начальном этапе расчет выполнялся без адаптации сетки и с нулевым перепадом давлений (давление на входе во входник и на выходе из улитки принималось равным опорному).

При расчете полной модели шаг по времени первоначально (при числе расчетных ячеек сетки 50 591) принимался фиксированным и равным 5×10^{-5} с. По прохождении 300...500 итераций давление на выходе из улитки

ступенчато повышалось до 40 кПа (шаг повышения 10 кПа), после чего была произведена адаптация расчетной сетки. По мере проведения адаптации расчетный шаг уменьшился до 1×10^{-5} с (из условия «неперескакивания через ячейку» на граничных условиях (ГУ) типа «скользящая поверхность»). Число расчетных ячеек сетки после адаптации составило 104 337.

В дальнейшем расчет производился до стабилизации параметров во входном и выходном сечениях. За критерий стабилизации принималось равенство осредненных значений расхода на входе и на выходе, а также постоянство его по времени. Кроме того, на конечном этапе расчета контролировались величина и характер изменения по времени полно-

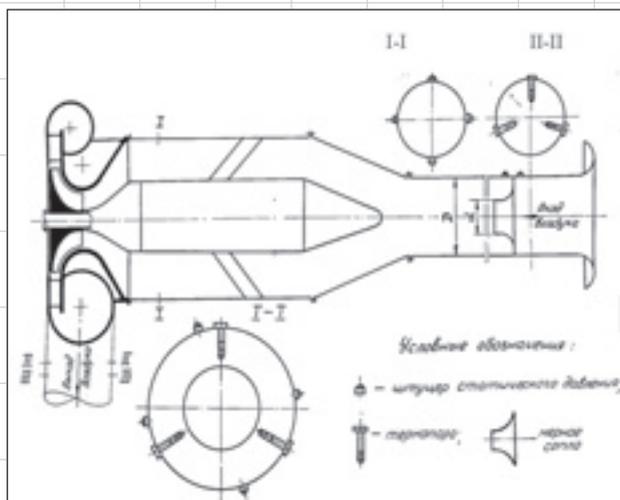


Рис. 2. Схема проточной части и замеров при стендовых

Комплексные инженерные решения САПР:

- аэродинамика
- прочность
- акустика
- технология

127083, Москва, ул. Юннатов, 18, оф. 701-708
Тел/факс: (095) 212-44-22, 212-42-62
www.tesis.com.ru info@tesis.com.ru



го давления, полной температуры и плотности воздуха на выходе из улитки. Дополнительно в процессе расчета визуализировалась картина течения в проточной части с помощью векторов скорости в плоскости продольного сечения проточной части.

После стабилизации параметров и сохранения результатов давление на выходе из улитки ступенчато увеличивалось и расчет продолжался с другим перепадом давлений.

При увеличении перепада давления между входным и выходным сечениями до определенного уровня начиналось изменение характера течения в проточной части, а именно появились возвратные течения, при этом решение теряло сходимость по расходу: расход падал и переходил к отрицательным значениям, что физически соответствует потере газодинамической устойчивости (помпажа) в проточной части компрессора. При достижении

такого перепада расчет приостанавливался и в дальнейшем продолжался с последнего установленного режима с уменьшенным приращением давления на выходе. Таким образом, после нескольких итераций можно ориентировочно определить границу помпажа.

По мере приближения к границе газодинамической устойчивости наблюдалось увеличение времени вычислений, необходимых для получения требуемой сходимости решения (при неизменном шаге по времени).

Расчет секторной модели проводился аналогично расчету полной модели, но с некоторой коррекцией шага по времени в связи с меньшей величиной размеров расчетных ячеек на ГУ типа «скользящая поверхность». Кроме того, на боковые поверхности подобластей были установлены ГУ периодичности.

На рис. 4 и 5 приведены графики зависимости степени повы-

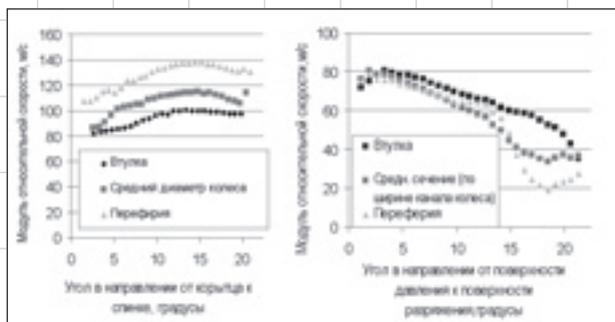


Рис. 6. Результаты расчета (секторная модель) относительных скоростей на входе (слева) и на выходе (справа) колеса

шения давления в компрессоре и адиабатического КПД от массового расхода воздуха, приведенного к стандартным условиям, при частоте вращения ротора ТК 21 000 об./мин по экспериментальным (полученным в ходе типовых испытаний) и расчетным данным.

В целом очевидна достаточно высокая степень сходимости между результатами эксперимента и расчета в части определения напорных характеристик и параметров эффективности компрессора. Расхождение между экспериментальными и расчетными параметрами полной модели в данном случае увеличивается по мере роста расхода воздуха, однако оно практически не превышает расхождения между характеристиками, снятыми на различных образцах одной и той же модификации турбокомпрессора, которое обусловлено технологическими отклонениями процесса изготовления и сборки, а также погрешностями эксперимента.

Напорная ветка по полным параметрам, рассчитанная для секторной модели, находится примерно на 4% выше, чем экспериментальная и рассчитанная для полной модели, что соответствует среднему значению относительных потерь в реальных улитках компрессоров (обычно от 2 до 8% — по статистике СКБТ, от 2 до 5% — по данным Н.Кампсти²).

На рис. 6 приведены результаты расчета секторной модели на входе и выходе колеса компрессора ТК23-06 при частоте вращения 21 000 об./мин, $P_1 = 1,56$ и $G_{пр} = 0,555$ в районе зоны максимального КПД. Сравнивая их с опубликованными Н.Кампсти² ре-

зультатами экспериментов по замеру меридианальной скорости в нескольких сечениях рабочего колеса компрессора полуоткрытого типа с радиальными лопатками, можно отметить сходимость расчетной картины течения с экспериментальными данными как в части регулярности течения во входной части колеса, так и в части наличия деформации течения на выходе из колеса, связанной с зоной повышенных потерь и отрыва («следа»), которая расположена в области угла между поверхностью разряжения и периферией лопаток колеса компрессора.

Результаты проведенных работ по верификации позволили прийти к выводу, что, придерживаясь определенной методики моделирования и расчета проточной части компрессора, разработанной в СКБТ при поддержке разработчиков программного продукта, можно добиться удовлетворительной сходимости результатов расчета с экспериментальными данными и адекватности картины течения, полученной при расчете во FlowVision, реальным физическим процессом. Было сделано заключение о перспективности данного направления работы, приобретены промышленная лицензия и необходимые аппаратные средства, определены направления дальнейших опытно-промышленных разработок и выделены сотрудники для проведения данных работ.

Далее, используя разработанную методику моделирования в программном комплексе

² Здесь и далее ссылка на кн.: Кампсти Н. Аэродинамика компрессоров/ Пер. с англ. М.: Мир, 2000.

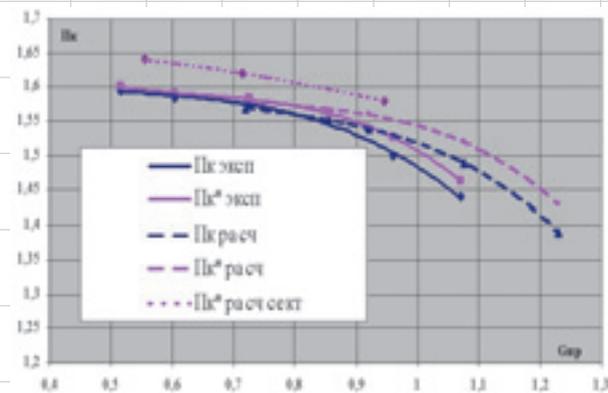


Рис. 5. Зависимость адиабатического коэффициента полезного действия компрессора ТК23Н-06 от приведенного расхода воздуха при $n = 21\ 000$ об./мин

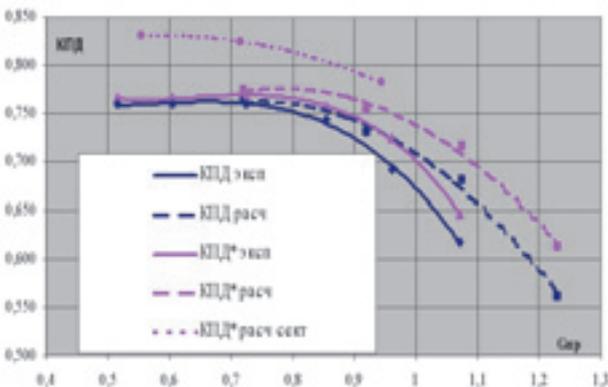


Рис. 4. Зависимость степени повышения давления в компрессоре ТК23Н-06 от приведенного расхода воздуха при $n = 21\ 000$ об./мин



FlowVision, была проведена серия расчетов компрессора с лопаточным диффузором для новой модификации ТК. Основной целью при проектировании данного компрессора было получение расходной характеристики с увеличенным диапазоном работы и обеспечение удовлетворительного КПД во всем диапазоне работы. Диапазон работы компрессора характеризуется отношением разности расходов на границе запирания и границе помпажа к расходу воздуха на границе помпажа при заданной частоте вращения ротора. Указанная выше цель обусловлена назначением ТК, который разрабатывался для регистровой системы наддува судового двигателя. Данная система наддува предполагает установку на двигатель двух турбокомпрессоров, включаемых в зависимости от режимов работы двигателя.

Техническим заданием на проектирование ТК был определен контрольный режим работы компрессора, которому соответствует расход воздуха $G_b = 3,2$ кг/с при степени повышения давления $P_k = 3,44$.

Одним из основных элементов проточной части, значительно влияющих на характеристику компрессора, является диффузор. По результатам предварительного расчета течения по имеющимся в ОАО «СКБТ» методикам был спроектирован лопаточный диффузор. Однако данные методики не дают полной картины течения рабочего тела, поэтому дальнейшие расчеты выполнялись в программном комплексе FlowVision. Для этого было спроектировано несколько вариантов лопаточного диффузора с различными геометрическими параметрами.

Расчетная модель компрессора (рис. 7) состоит из подобластей: входного канала, колеса компрессора и диффузора. Для уменьшения расчетной области и расчетного времени воздухооборота улитка заменена осевым кольцевым выходом. Варианты лопаток диффузора загружались в модель через фильтр подвижного тела, что значительно сокращает время на построение и подготовку моделей при вариантных расчетах.

При расчетах использовалась математическая модель — *полностью сжимаемая жидкость (Fully Compressible Fluid)*. Параметры граничных условий на входе и выходе расчетной модели задавались исходя из соответствия параметрам течения воздуха в компрессоре, заданным в техническом задании на проектирование. Граничные условия на стенках заданы с учетом реальной шероховатости элементов проточной части. Вращение колеса компрессора моделировалось заданием движения подобласти «скользящими» поверхностями. Между периферийными торцами лопаток колеса компрессора и поверхностью профильной вставки введена *стандартная модель зазора*. Параметры рабочего тела (воздуха) загружались из встроенной базы данных.

По результатам вариантных расчетов был выбран диффузор с минимальным уровнем аэродинамических потерь. На рис. 8 представлен график углов атаки потока на лопатки данного диффузора в зависимости от высоты лопатки (P — на периферии, C — в среднем сечении, B — у втулки) при различных расходах воздуха.

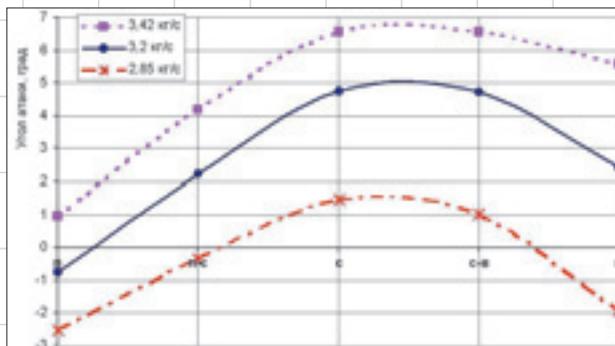


Рис. 8. Углы атаки потока на лопатки диффузора

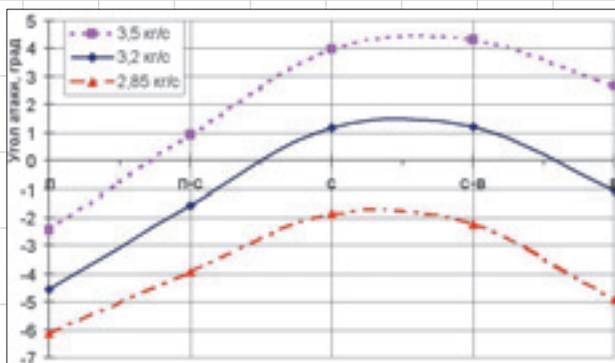


Рис. 9. Углы атаки потока на лопатки скорректированного диффузора

Однако анализ параметров потока на входе в диффузор показал, что углы атаки ядра потока на лопатки в контрольной точке ($G_b = 3,2$ кг/с) превышают оптимальные ($+2 \pm 0^\circ$). А максимальный КПД достигнут при меньшем расходе воздуха (2,85 кг/с), что соответствует оптимальным углам атаки.

В связи с вышесказанным диффузор был перепрофилирован с целью оптимизации углов атаки, а соответственно уменьшения аэродинамических потерь на контрольном режиме работы компрессора. Углы атаки потока, полученные по результатам расчета компрессора с данным диффузором, представлены на рис. 9.

Для испытаний натурных образцов ТК и сравнения результатов расчета с экспериментальными данными было изготовлено два диффузора, геометрические параметры которых соответствовали рассмотренным выше вариантам. Экспериментальные данные, полученные в ходе испытаний натурного образца ТК, подтвердили правильность выбора параметров диффузора на основе расчетов в программном ком-

плексе FlowVision. При этом достигнуто прогнозируемое расчетом увеличение диапазона работы компрессора с 0,44 до 0,48 с увеличением общего уровня КПД примерно на 1,5% (диапазон работы на серийных модификациях при $P_k \approx 3 \dots 3,5$ ранее составлял 0,3...0,35).

Аналогичные расчетные исследования проточной части турбины того же ТК и последующий анализ дали возможность определить параметры течения рабочего тела в ее элементах. При этом было выявлено неоптимальное натекание потока на часть лопаток соплового аппарата, что объясняется конструкцией газоприемного корпуса (рис. 10).

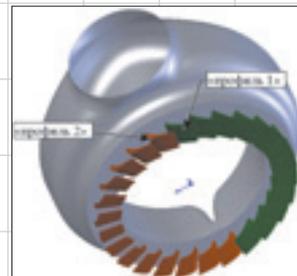


Рис. 10. Модель газоприемного корпуса с сопловыми лопатками

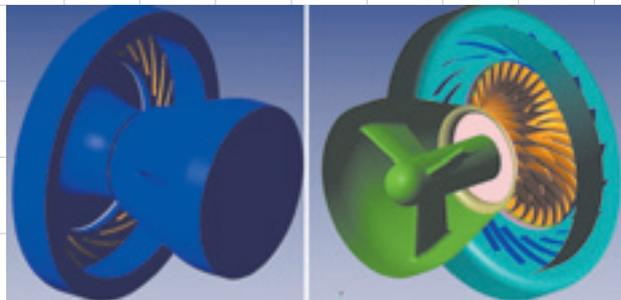


Рис. 7. Расчетная модель проточной части компрессора

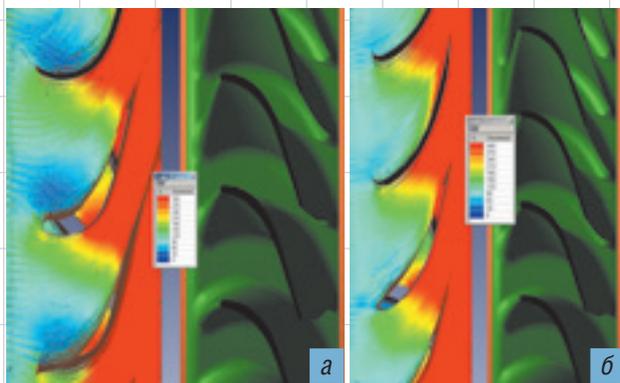


Рис. 11. Визуализация линий тока в СЛ: а — профиля 1; б — профиля 2

При данной схеме поток на входе разделяется на два: одна часть течет в направлении вращения ротора — через сопловые лопатки (СЛ) профиля 1 (см. рис. 10), а другая — через СЛ профиля 2. Анализ потока в сопловом аппарате показал большие углы атаки на входе в СЛ профиля 2, приводившие к неравномерности потока по окру-

жности на выходе. На рис. 11 представлена визуализация линий тока в СЛ профиля 1 и в СЛ профиля 2, раскрашенных по модулю скорости.

Для оптимизации потока был изменен угол входной кромки данной СЛ с условием сохранения минимального проходного сечения («горла»). Анализ дальнейших расчетов проточной части

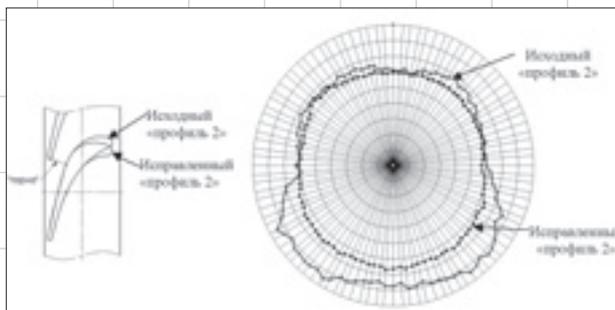


Рис. 12. Тангенциальная скорость на выходе из соплового аппарата с исходным и исправленным профилем 2

турбины показал выравнивание параметров потока на выходе из соплового аппарата по окружности (рис. 12).

Таким образом, расчетные проработки проточной части турбины и компрессора в программном комплексе FlowVision при проектировании новой модификации ТК позволили сократить время и средства на ее корректировку и доводку и в кратчайшие сроки спроектировать и изгото-

вить опытно-промышленные образцы ТК.

В настоящее время в ОАО «СКБТ» продолжают работы по отработке и рационализации методики проведения расчетов во FlowVision для использования данного комплекса в качестве виртуального стенда с целью минимизации объема работ и затрат средств и времени, связанных с созданием, испытанием и доводкой натуральных элементов перспективных ТК. ▶

НОВОСТИ

Autodesk представляет программное обеспечение для создания высококачественных, экономически эффективных приложений

22 июня российское представительство Autodesk, Inc. представила технологию Autodesk RealDWG 2006 для создания приложений, в которой так нуждались разработчики. Autodesk RealDWG 2006 (бывшая ObjectDBX) позволяет независимым поставщикам приложений разрабатывать и продвигать на рынок продукты, способные читать и записывать данные в самых распространенных в мире форматах, таких как AutoCAD DWG и DXF. Autodesk RealDWG 2006 гарантирует максимальный среди всех коммерческих продуктов уровень надежности и точности, а также полную совместимость с лучшими в своем классе продуктами Autodesk, включая AutoCAD, Autodesk Inventor Series, Autodesk Revit Building, Autodesk Architectural Desktop, Autodesk Civil 3D, Autodesk Map 3D и AutoCAD LT. Новые цены и условия лицензирования делают Autodesk RealDWG 2006 приоритетной платформой разработки для миллионов пользователей, которые создают конструкторские данные, манипулируют этими данными и беспрепятственно обмениваются ими с внешними командами разработчиков в строительстве, промышленном производстве, а также в секторах государственного управления, коммунальных служб и инфраструктуры.

«Мы надеемся, что Autodesk RealDWG 2006 позволит нам гораздо полнее удовлетворить потребности наших заказчиков в DWG-обработке, — говорит Джо Муринг (Joe Mooring), вице-президент фирмы PLP Digital Systems, разрабатывающей ПО для компаний, которые производят, хранят, распространяют и отслеживают техническую документацию. — Библиотеки DWG от независимых поставщиков, которыми мы пользовались до сих пор, не успевают за планами выпуска продуктов Autodesk и не обеспечивают той высокой точности, которая требуется нашим заказчиком. Используя Autodesk RealDWG 2006 в составе пакета ПО PlotWorks, мы обеспечим заказчиков из сферы оперативной полиграфии и строительного проектирования средствами для высокоскоростного, высокоточного извлечения данных из файлов DWG».

Пакет Autodesk RealDWG, построенный на базе собственных библиотек DWG из программного обеспечения AutoCAD, минимизирует риски, связанные с повреждением или ошибками в файлах чертежей, составляющих конструкторскую докумен-

тацию, и гарантирует разработчикам приложений, что их продукты будут производить правильные форматы DWG 2004 и DWG 2000. Продукты, использующие Autodesk RealDWG, позволят уверенно обмениваться файлами чертежей, даже если у членов команды, работающей над проектом, не установлена последняя версия программного обеспечения Autodesk. К тому же Autodesk RealDWG отличается новыми, упрощенными условиями лицензирования и выгодными ценами, что облегчает поставщикам приложений использование новейшей технологии AutoCAD DWG сразу же после ее появления и в конечном счете помогает им выпускать на рынок конкурентоспособные продукты. Autodesk RealDWG представляет собой уникальное сочетание мощных инструментов разработки приложений Microsoft .NET, открывая перед мировым сообществом разработчиков .NET новые коммерческие возможности.

Продажи программного обеспечения Autodesk продолжают расти, что приводит к появлению миллионов файлов DWG по всей планете, — говорит Джон Сандерс (John Sanders), вице-президент отделения Autodesk Platform Technology Division. — Но разработчикам приложений меньше всего приходится беспокоиться о том, достаточно ли прочна и современна платформа, на которой они строят свои продукты. Экономически эффективная платформа разработки, Autodesk RealDWG 2006, открывает перед этими разработчиками новые бизнес-возможности, помогая заказчикам пользоваться своими конструкторскими данными, чтобы точнее и эффективнее выполнять свою работу».

Разработчики ПО в странах СНГ могут заказать лицензию на доступ к Autodesk RealDWG напрямую от Autodesk, Inc., заполнив форму заявки на веб-странице www.autodesk.com/autodeskrealdwg. Годовая лицензия на распространение стоимостью 5000 евро предоставляет право на распространение одного приложения с применением Autodesk RealDWG и любых обновлений к программному обеспечению в течение года. После этого годовая лицензия на распространение будет стоить 2500 евро. Компании могут также присоединиться к Autodesk Developer Network, чтобы получать поддержку по программному обеспечению Autodesk RealDWG для разработчиков.