

# Численная оптимизация нестационарных тепловых процессов турбокомпрессора

Fabiano Bet, Gerald Seider (компания InDesA GmbH)

©2014 журнал "Dynamics"

## Введение

С повышением требований к эффективному использованию топлива и контролю выбросов выхлопных газов сегодня растет спрос на турбокомпрессоры – их применяют в автомобилях для повышения мощности двигателя и снижения расхода топлива. Изначально созданные для авиационных двигателей, работающих на больших высотах, турбокомпрессоры обеспечивают наддув, что улучшает характеристики двигателя. В настоящее время турбокомпрессоры широко используются в автомобилях, мотоциклах, грузовиках, поездах и морских судах. Они преобразуют энергию отработанных выхлопных газов двигателя в сжатие воздуха, и в двигатель поступает большее количество смеси воздуха с топливом. Таким образом, мощность двигателя возрастет, причем без существенного увеличения веса.

Стандартный турбокомпрессор состоит из турбины и компрессора, соединенных валом. Выхлопные газы двигателя приводят в движение турбину, которая, в свою очередь, приводит в действие компрессор, который засасывает воздух через впускное устройство. Чтобы уменьшить вес, турбина и компрессор изготавливаются из керамических материалов. Высокая скорость вращения турбины – иногда в 30 раз выше скорости вращения коленчатого вала – наряду с высокой температурой выхлопных газов, делает терморегулирование турбокомпрессоров критическим моментом для разработчиков.

Интеграция современных вычислительных методов в цикл разработки продукта помогает определить тепловое состояние турбокомпрессоров через моделирование работы отдельных компонентов и системы в целом. Численное моделирование открывает спектр возможностей для исследования механизма и эффективности работы вращающихся компонентов турбокомпрессора с тепловой точки зрения. Последние достижения в области вычислительной гидродинамики (*Computational Fluid Dynamics* – **CFD**) превратили расчет переходных процессов в практический инструмент анализа турбокомпрессора. В

данной статье описывается применение компанией InDesA вычислительных методов, предлагаемых CAE-системой **STAR-CCM+** компании CD-adapco.

## Разработка турбокомпрессора с тепловой точки зрения

Турбокомпрессор термодинамически связан с двигателем внутреннего сгорания и приводится в действие выхлопными газами, которые, расширяясь в турбине, приводят в действие компрессор, механически связанный с турбиной через вращающийся вал. Температура горячих выхлопных газов бензинового двигателя может превышать  $1000^{\circ}\text{C}$  на входе в турбину. Их необходимо изолировать от поступающего в компрессор воздуха, имеющего температуру окружающей среды. Разница в температурах до  $1000^{\circ}\text{C}$  в одном компоненте с вращающимися на очень высоких скоростях частями является большой проблемой не только с механической точки зрения.

Терморегулирование означает уравнивание тепловых потоков внутри турбокомпрессора с одновременным контролем и ограничением температуры конструкции корпуса турбокомпрессора и вращающегося узла, а также смазки и охлаждающей жидкости. Это также означает регулирование теплопереноса излучением, конвекцией и теплопроводностью с окружающими и соседними компонентами. При этом тепловое взаимодействие с окружающими элементами

может оказаться настолько сильным, что приведет к повреждению турбокомпрессора, выпускного коллектора, а также соседних компонентов.

Разность температур между выхлопными газами и впускаемым воздухом – не единственная сложная задача для инженеров. Температура может изменяться из-за внезапного изменения нагрузки – например, вследствие падения ускорения при полной нагрузке до нуля. Такие случаи могут стать причиной изменения температуры на выходе турбоагрегата в несколько сотен градусов за несколько секунд, вызывая высокие тепловые напряжения и, в конечном итоге, износ. Именно поэтому нестационарные тепловые расчеты столь важны для анализа прочности конструкции и



компоновки элементов турбокомпрессора.

Тепловая надежность – главная цель теплового регулирования. Однако следует отметить, что теплоперенос от выпускного коллектора к компрессору может снизить эффективность компрессора, что непосредственно влияет на работу двигателя. Кроме того, вблизи границ газодинамической устойчивости работа компрессора может стать нестабильной.

Тепловой расчет турбокомпрессора основан на тщательном анализе процессов газодинамики. Давление от газового потока в турбине и компрессоре балансируется за счет потерь на трение от вращающегося вала и преодоление инерции вращающегося узла, что позволяет турбокомпрессору работать как в стационарном, так и в нестационарном режиме.

Компания *InDesA* накопила достаточно опыта в расчетах течений газа в компрессорах и турбинах с помощью CAE-системы *STAR-CCM+*, которая обеспечивает даже расчет локальных областей сверхзвукового потока и взаимодействия с ударными волнами в диффузоре компрессора в режимах, близких к режиму помпажа. Таким образом, *STAR-CCM+* дает возможность моделировать работу компрессоров во всей рабочей области, что является одним из условий анализа нестационарных потоков и тепловых явлений.

### Методология расчета

Для расчета турбокомпрессора и окружающих элементов нами был выбран прямой связанный метод расчета теплового взаимодействия газообразной среды с твердым телом (*CFD/CHT*). Модель состояла из следующих сред (рис. 1):

- выхлопной газ;
- впускаемый воздух;
- охлаждающая жидкость;
- масло для двигателя;
- различные материалы для вращающегося узла, корпуса компрессора и турбины, подшипников и затворов, а также для тепловых экранов.

Вращающийся узел связан с потоком через компрессор и турбину за счет взаимодействия “жидкость – твердое тело”, где результирующие моменты от потока на колесо компрессора и турбины используются для расчета углового ускорения узла.

Момент трения для подшипников и затворов оценивался с помощью двух зависимых переменных – угловой скорости и температуры масла. На границе вращающегося узла с невращающейся областью задается условие скольжения.

Для замыкания системы применялся упрощенный подход, связывающий

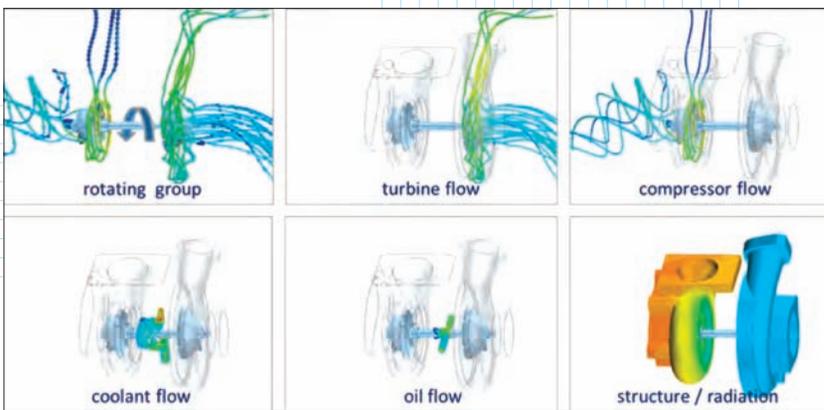


Рис. 1. Подсистемы для связанного расчета турбокомпрессора

поток на выходе компрессора с потоком на входе в турбину путем использования базовых термодинамических моделей для описания охлаждения всасываемого воздуха, а также полевых функций – для описания регулирования фаз клапанного распределения на входе и выходе из камеры сгорания через пользовательские переменные. Чтобы ускорить работу турбокомпрессора, был увеличен массовый расход топлива; расход топлива регулируется за счет соотношения топливно-воздушной смеси.

Для более реалистичного моделирования работы двигателя, дизельного или бензинового, рекомендуется использовать 1D-модель *GT-POWER*, которую можно напрямую связать с CAE-моделью *STAR-CCM+*; она позволяет лучше контролировать дроссель, систему впрыска топлива, зажигание, такт клапана, выпускной клапан и скорость рециркуляции отработавших газов.

### Расчетная модель и граничные условия

Исследуемый турбокомпрессор показан на рис. 2. Он соединен с простым литым выпускным коллектором, имеющим внизу тепловой экран, выпускной трубой. К компрессору прикреплены впускной и выпускной патрубки. Использовалась модель сопряженного теплообмена (*Conjugate Heat Transfer – CHT*). Для расчета была создана сетка с многогранными ячейками для всех жидкостных и твердых сред.

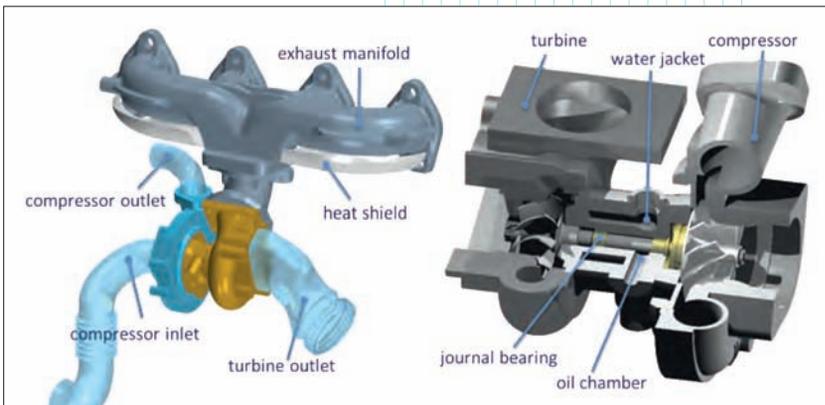


Рис. 2. Расчетная модель турбокомпрессора

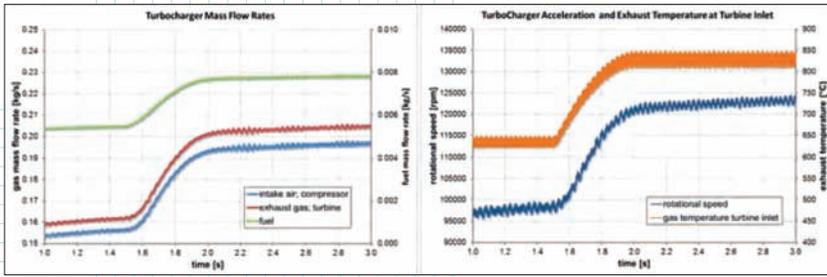


Рис. 3. Динамическая реакция турбокомпрессора

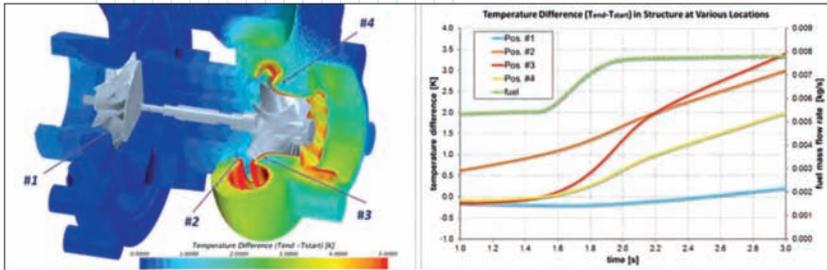


Рис. 4. Тепловая реакция на ускорение турбокомпрессора

Чтобы описать пограничный слой потока, жидкостные области вблизи твердых стенок были измельчены, как минимум, 4-мя призматическими слоями. Для большей точности применялись согласованные интерфейсы “узел в узел”. Конечная сетка состояла из 14 млн. ячеек с 24-мя областями и семью физическими континуумами.

За пределами компрессора объемная сетка не использовалась, так как тепловые экраны связаны термически с системой только посредством излучения. На внешних (наружных) поверхностях турбокомпрессора и тепловых экранов мы указывали коэффициенты теплопереноса и температуру окружающей среды, что необходимо для расчета тепловой конвекции. На границе входа охлаждающей жидкости и масла были заданы объемный расход и температура впуска, тогда как для впускаемого воздуха граничные условия на входе были заданы как давление и температура торможения. На выходе компрессора было указано противодавление. Наконец, переходный процесс системы регулировался расходом топлива с условием, что вследствие изменения нагрузки частота вращения двигателя не изменялась.

На рис. 3 показан неустановившийся процесс массового расхода выхлопных газов и впускаемого воздуха по мере увеличения массового расхода топлива. Данный этап задачи разделен на три периода:

- стационарный период работы двигателя и теплового состояния;
- период с линейно-возрастающим расходом топлива до определенного значения;
- устойчивый режим работы двигателя.

В последнем периоде возобновляется устойчивая работа двигателя, при котором тепловые условия начинают подстраиваться под новый режим работы турбокомпрессора с более высокой скоростью. Колебания массового расхода топлива вызваны регулированием соотношения “топливо/воздух” и,

следовательно, колебания могут наблюдаться и для массового расхода газа.

## Обсуждение результатов

Для простоты предполагается, что давление выхлопных газов на входе выпускного коллектора соответствует давлению наддува (на всасывании). Инерция двигателя и трансмиссии не учитываются. Как следствие, наблюдается быстрая реакция выхлопных газов и вращающегося узла (рис. 3).

Тепловая реакция отстает от механической реакции турбокомпрессора. Фактически, для изменений температуры в различных зонах характерна различная продолжительность переходного процесса (рис. 4). В конце расчета, по прошествии трех секунд, температуры не достигли постоянных значений. На этом этапе поле потока стабильно, и если необходимо получить окончательное тепловое состояние, то можно

выполнить расчет вращающегося узла в подвижной системе отсчета.

Профили температуры позволяют определить, может ли нестабильный режим стать критическим для конструкции турбокомпрессора. В заключение, для определения критических тепловых напряжений, необходимо выполнить в среде STAR-CCM+ анализ неустановившихся напряжений с вводом температурного поля на шаге временной дискретизации. График температурных контуров на шаге временной дискретизации показан на рис. 5.

Температура колеса и корпуса турбины зависит, в первую очередь, от температуры выхлопных газов, а колеса и корпуса компрессора – от сжатия воздуха. Мгновенное температурное поле определяется балансом всех тепловых потоков, движущихся от конструкции турбокомпрессора к охлаждающей жидкости и моторному маслу, а также к окружающей среде посредством конвекции и излучения. Кроме того, для точного определения температуры конструкции необходимо рассчитать тепловое взаимодействие различных частей турбокомпрессора и теплового экрана.

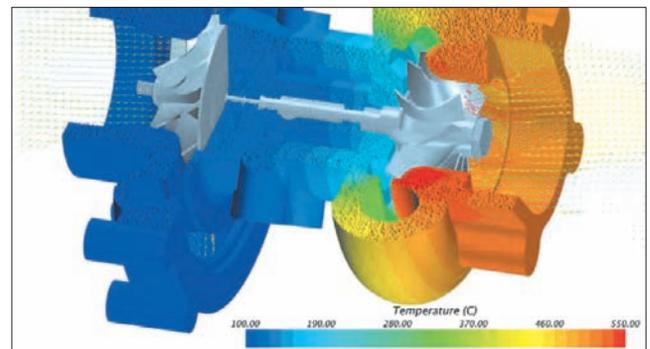


Рис. 5. Температурные контуры на конструкции турбокомпрессора

В принципе, при выявлении в ходе анализа конструкции критических напряжений, можно предложить три варианта решения проблемы. Как правило, её можно решить за счет снижения температуры, исправления геометрии для уменьшения теплового напряжения или выбора более надежных материалов для изготовления турбокомпрессоров. Температуры выхлопных газов можно регулировать, ослабляя наддув, тормозя время зажигания и обогащая смесь из воздуха и топлива.

Однако существует и другой вариант, который предусматривает проведение тщательного анализа тепловых потоков внутри турбокомпрессора. Как только мы получим представление о взаимодействии тепловых потоков между различными средами, мы впоследствии сможем регулировать их за счет небольших изменений водяной рубашки или тепловых мостов внутри конструкции. Такой способ решения тепловых задач зачастую оказывается намного эффективнее простой подгонки (корректировки) параметров горения.

### Заключение

Сегодня тепловой расчет стал простым и надежным методом исследования виртуальной модели,

применяемым при компьютерном проектировании турбокомпрессоров. Он предоставляет существенные данные для анализа прочности конструкции, в ходе которого выявляются тепловые напряжения, которые могут привести к износу конструкции.

Для облегчения задачи тепловые напряжения зачастую рассчитываются только для состояний нагрева/охлаждения. Тем не менее, переходный тепловой расчет может оказаться более важным в сравнении со стационарным расчетом, поскольку позволяет определить неустановившиеся тепловые напряжения. С другой стороны, переходные (нестационарные) тепловые эффекты могут «смягчить» внезапные скачки температуры, так как тепловая инерция элементов конструкции позволяет ослабить воздействие внезапных скачков температуры. Краткосрочное, но внезапное ускорение турбокомпрессора не сразу приводит к критическому росту температуры. Переходные тепловые расчеты позволяют получить точные результаты расчетов тепловых напряжений.

Описанная методика позволяет, используя CAE-систему STAR-CCM+ от CD-adapco, успешно проводить сопряженные расчеты течений газа и переходных тепловых процессов в турбине и компрессоре с вращающимися узлами за приемлемое время. 🍷

◆ Выставки ◆ Конференции ◆ Семинары ◆



## Металлообработка Сварка

**7 - 10**  
**апреля 2015**

14-я международная выставка технологий, оборудования, материалов и средств защиты для машиностроения, металлообрабатывающей промышленности и сварочного производства

крупнейший специализированный региональный проект в России

**Время работы выставки**  
7 апреля: 12.00-18.00  
8-9 апреля: 10.00-18.00  
10 апреля: 10.00-15.00



Выставочный центр  
**ПЕРМСКАЯ  
ЯРМАРКА**

**Официальная поддержка:**  
Правительство Пермского края  
Пермская торгово-промышленная палата  
Российская ассоциация производителей станкоинструментальной продукции «Станкоинструмент»

**Партнёры выставки:**  
Региональные ассоциации машиностроительных предприятий  
Региональное объединение работодателей Пермского края «Сотрудничество»  
«Центр прогрессивных технологий Урал ИнКо»  
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

614077, Россия, Пермь,  
бульвар Гагарина, 65  
(+7 342) 262-58-58

[www.exporperm.ru](http://www.exporperm.ru)