УДК 621.433.001.57

БОНДИН Ю.Н., научно-производственный комплекс газотурбостроения, г. Николаев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ СОЗДАНИИ НОВЫХ И МОДЕРНИЗАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩИХ

У статті проводиться аналіз переваг моделювання при створенні нових і модернізація існуючих газотрубинних двигунів. Обґрунтовується, що використання одночасно математичного та фізичного моделювання дозволяє істотно скоротити строки проектування і витрати на доведення складних об'єктів.

In the article the analysis of advantages of design is conducted at creation of new and modernization of existing gas turbine engines. It is grounded, that the use simultaneously of mathematical and physical design allows to reduce substantially the terms of planning and expense on making of difficult objects.

Постановка проблемы и выделение нерешенных задач, цель исследований

Процесс модернизации, а тем более создания нового газотурбинного двигателя весьма длителен по времени и связан с решением ряда противоречивых проблем, требующих последовательной оптимизации и компромиссных решений. Создание сложных натурных объектов, к каким относятся и газотурбинные двигатели, невозможно без комплексного решения проблем взаимодействия отдельных деталей и взаимосвязанных узлов. Для ускорения решения частных вопросов и проблемы проектирования в целом достаточно давно использовались упрощенные модели объектов исследования. До сравнительно недавних дней использовались только физические модели, подавляющее большинство которых представляло масштабный прототип объекта в целом или его элемента. Масштабная физическая модель начала работать в последние 50 лет в качестве необходимого вспомогательного средства, значение которого постоянно увеличивается.

Изложение основного материла

Физическая модель воспроизводила кинематику взаимных перемещений элементов конструкции, механизм их взаимодействия и специфику контактирования. Физическая модель позволяет оценить реальное распределение нагрузок, относительную прочность элементов и особенности приложения сил. Физическая модель может помочь определению влияния трудно учитываемых факторов, например, внешней среды или специальных тонких покрытий.

Преимущества физической модели:

- Малый срок изготовления сравнительно с натурным объектом.
- Техническая документация для большинства испытуемых элементов и технологического оборудования имеется в наличии.
- Физическая готовность большинства исследуемых деталей и стандартных элементов.
- Экономия денег и времени при технологического оснащения и подготовке эксперимента.

Существенным недостатком физической модели является ее конкретность размеров и одноразовость испытаний при максимальных нагрузках. Последний фактор особенно неприятен, поскольку часто наиболее напряженным оказывается не исследуемый элемент, а это приводит к частичному или полному разрушению модели до получения намеченного результата, и к задержке проведения исследований в связи с необходимостью изготовления новой модели.

Не менее серьезным недостатком физической

модели является определенная разница физических процессов в натурном изделии и его модели. Особенно это касается газодинамических и тепловых процессов. Для получения объективных результатов и качественного перенесения их на натурный объект необходимо использовать определенные критерии и коэффициенты.

В качестве примера рассмотрим испытания камер сгорания на модельном стенде. Процессы, происходящие в камере (химические, газодинамические, теплообменные), чрезвычайно сложны и расчетным исследованиям поддаются с трудом. Значительно быстрее (и точнее) результат можно получить прямым экспериментом.

Проведение исследований камер сгорания на натурных образцах ГТД сопряжено с двумя принципиальными трудностями: необходим уже готовый опытный двигатель (или близкий по конструкции натурный прототип) и готов полный комплект жаровых труб (8…20 шт. в зависимости от конструкции камеры сгорания), что требует больших затрат на оснащение производства. Сами испытания требуют больших расходов топлива, а самые незначительные переделки жаровых труб (например, изменение диаметров отверстий для воздуха) связаны с неоднократными переборками двигателя.

Поэтому основной объем работ по доводке новых конструкций камер сгорания проводится на специальных испытательных стендах. Работы проводятся на отсеках, представляющих часть натурной камеры сгорания со штатной жаровой трубой (реже – с несколькими трубами). Наиболее сложно при эксперименте обеспечить натурные давления (15…20 ати) при натурных расходах (3…6 нм^3/сек). Поэтому используются низко- и средненапорные воздуходувные средства, а испытания ведутся на модельных режимах. В качестве критерия используется равенство скоростей газовоздушной смеси на модели и в натуре при одинаковом подогреве смеси в камере. Испытания производится при одинаковых объемных расходах ($V_H = V_M$). Одновременно обеспечивается одинаковый подогрев газа в камере сгорания $(t_{03} - t_{02})_H = (t_{03} - t_{02})_M$. При этом сохраняются натурные коэффициент избытка воздуха а, тип топлива и размеры деталей, а влияние остальных параметров, по мнению [1], не существенно. Следует отметить, что, как показал опыт исследований, некоторые параметры (например, скорость распространения пламени) при этом не сохраняются, но это важно только при специальных исследованиях (например, пульсационного горения).

Значительное снижение давления воздуха при эксперименте позволяет обходиться относительно небольшими расходами воздуха и топлива, а также сократить объем изготовления и доработок материальной части для проведения опытно-конструкторских работ.

По результатам лабораторных исследований возможно с большой степенью достоверности прогнозировать распределение температур в потоке, эффективность конструктивных решений и даже ожидаемый уровень выбросов в атмосферу оксидов азота NOx и монооксида углерода CO при работе натурных образцов ГТД.

Для оценки ожидаемой эмиссии вредных выбросов при эксперименте должно быть соблюдены дополнительные условия:

- температура воздуха на входе экспериментальной камеры сгорания должна быть максимально близкой к натурным значениям;
- должна сжигаться хорошо подготовленная топливно-воздушная смесь.

Последнее условие связано с тем, что одним из основных факторов, влияющих на образование оксидов азота NOx, является температура в зоне горения, которая в свою очередь в локальных зонах зависит от качества смешения топлива с воздухом. Минимальная концентрация оксидов азота образуется при горении бедной ($a \geq 1{,}6$) и максимально однородной топливно-воздушной смеси. Это происходит при отсутствии локальных зон с высокой местной концентрацией топлива, в которых температура превышает значение 1750 К. Для выполнения последнего условия опытные конструкции камер сгорания подвергают исследованиям смесеобразования и определения неравномерности концентрации топливного газа в объеме жаровой трубы на специальной установке.

Примером модельной доводки является отработка низкоэмиссионной камеры сгорания с двухрядным фронтовым устройством и системой предварительного смешения воздуха и топливного газа. В процессе непродолжительных испытаний ГТД со вновь спроектированным опытным фронтовым устройством произошло выгорание стакана центрального завихрителя и подгорание наружной стенки периферийного завихрителя. Для оценки аэродинамики камеры на аэродинамическом стенде были проведены работы по оптимизации проходных сечений каналов завихрителей. Новая форма каналов обеспечила безотрывное течение по всей длине и устранила зону дополнительной стабилизации горения, которая приводила к повышенной температуре в стакане. Затем была отработана оптимальная конструкция и размеры лопаточных устройств завихрителей. Одновременно с аэродинамическими исследованиями проведены работы по доводке системы раздачи топливного газа.

В процессе экспериментальных исследований была доведена конструкция жаровой трубы с конвективной системой охлаждения, что позволило в несколько раз снизить уровень выбросов монооксида углерода CO на частичных режимах работы ГТД.

Проведенные работы позволили при испытаниях ГТД GT3000 получить концентрацию выбросов на номинальном режиме работы NOx в районе 30 ppm, CO – 10 ppm.

Разработка современных методов математического описания процессов, происходящих в элементах и объекте в целом, а так же широкое использование быстро вычислительной техники позволило в последнее время активно использовать математические модели – математическое описание объекта и процессов в нем происходящих в виде системы взаимосвязанных уравнений. Одной из основных сложностей при создании математической модели, адекватной реальному объекту, является необходимость учета влияния второстепенных связей и элементов, большинство из которых изучены недостаточно, но могут оказать существенное влияние на процессы в объекте моделирования.

Большим преимуществом математической модели является возможность произвольного изменения отдельных элементов, связей и внешнего воздействия на модель, что позволяет эмпирическим путем найти ряд важных закономерностей во взаимодействии элементов модели, а, следовательно, и натурного объекта.

Рабочий процесс ГТД можно описать системой дифференциальных уравнений с исключительно сложными граничными условиями. Решение этой системы уравнений без ряда упрощений и допущений практически нереально. Один из основных принципов, позволяющих существенно упростить систему уравнений, - принцип иерархии. Результаты расчетов на более низких уровнях представляются характеристиками, используемыми на более высоком уровне. На самых низких уровнях производится расчет или экспериментальное исследование локальных процессов. Экспериментальной проверке подвергаются расчеты на всех уровнях, при этом расчетные характеристики корректируются.

Принятый принцип иерархии позволяет произвести разделение (декомпозицию) основной задачи на ряд более простых подзадач, каждая из которых может быть исследована своими методами.

Наличие мощной вычислительной техники позволяет на всех иерархических ступенях использовать математическое описание процесса и создать единую математическую модель объекта. В зависимости от поставленной задачи расчет может быть произведен с большей или меньшей степенью детализации.

Из большого количества существующих типов математических моделей для наших нужд наиболее подходит модель, сформированная из различных модулей нужной структуры. Математическая модель строится из отдельных самостоятельных частей (блоков и модулей), позволяющих заменять, добавлять и совершенствовать отдельные части без нарушения общей системы. Такая модель обладает рядом существенных преимуществ:

- значительно упрощается отладка программы, поскольку отдельные блоки доводить легче;
- из готовых блоков и модулей легче формировать новые программы расчета при изменении или уточнении постановки задачи;
- математическая модель получается гибкой и универсальной;
- снижаются затраты инженерного времени на поиск способов проведения расчетов и высвобождается время на анализ физических процессов.

Модель обязательно должна пройти фазу согласования с экспериментом (идентификацию), для чего существуют различные методы. В наших условиях метод согласования должен быть простым, гибким и легко перестраиваться на различные условия согласования (минимум суммы квадратов ошибок, минимум суммы модулей ошибок и др.).

Готовая модель должна отвечать трем основным требованиям:

- модель должна быть доступна для использования ее простым инженером;
- точность информации, полученной в процессе математического моделирования должна быть соизмерима с точностью информации, полученной в результате натурных испытаний;
- рекомендации, разработанные на основе исследования математической модели, должны быть конкретными.

Для примера рассмотрим математическую модель ГТД. Увеличение глубины детализации расчета не всегда приводит к повышению точности математической модели. В частности, аппроксимация экспериментальных характеристик компрессора в зоне экспериментальных исследований будет точнее математической модели самого высокого уровня сложности. Как правило, любые изменения в проточной части компрессора сопровождаются снятием его экспериментальных характеристик. В то же время экспериментальное исследование компрессора значительно проще, чем турбины, и часто отсутствуют экспериментальные характеристики турбин. Поэтому с точки зрения точности математической модели следует увеличивать глубину детализации расчета турбинного тракта, например, до уровня отдельных лопаточных венцов. Тем более что в настоящее время имеются простые инженерные методы расчета течения газа через лопаточные венцы турбин.

Примером использования предложенной математической модели ГТД является исследование возможности модернизации серийного двигателя для использования в тепловой схеме “Водолей”.

При применении упомянутой тепловой схемы пар от утилизационного котла направляется в газовую турбину, что приводит к существенному увеличению мощности и КПД установки. При впрыске пара в первый сопловой аппарат турбины возрастает расход рабочего тела через турбину, что может привести к запиранию турбины и помпажу компрессора. При подаче пара компрессор не претерпевает конструктивных изменений и его заранее снятая экспериментальная характеристика остается неизменной. В математической модели проточного тракта изменяются только проходные сечения лопаточных венцов турбины. За счет некоторого усложнения турбинных блоков модели исследована возможность увеличения проходных сечений за счет подрезки выходных кромок сопловых и рабочих лопаток турбины. Конкретные результаты расчета позволили выполнить эту технологическую операцию. Некоторая потеря оптимальной формы лопаток и связанное с ним снижения КПД турбины с большим запасом перекрывалось увеличением КПД установки в целом за счет использования принципиально новой тепловой схемы.

Выводы

Испытания опытной турбины с подрезанными лопатками полностью подтвердили расчетные характеристики установки. Использование математической модели позволило существенно сократить время и стоимость опытно-доводочных работ при решении большой проблемы.

Используя одновременно математическое и физическое моделирование можно существенно сократить сроки проектирования и затраты на доводку сложных объектов. Одним из возможных путей ускорения проектирования и повышения его

Література

1. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей, изд. 3, М., “Машиностроение”, 1984.