

Разработка Цифрового двойника турбовинтового двигателя ТВ7-117СТ-01

В период четвертой промышленной революции и в условиях поиска оптимальных решений для разработки и последующего сопровождения сложных наукоемких технических изделий (для управления изделиями на всех стадиях жизненного цикла) многие организации в своей деятельности обращаются к концепции Цифрового двойника (Digital Twin).

Для термина “Цифровой двойник” в настоящее время не существует общепринятого единого и исчерпывающего определения. Употребляемые различными высокотехнологичными организациями трактовки могут быть классифицированы по следующим принципам:

- ▶ область применения данной технологии в тех или иных производственных процессах;
- ▶ масштаб применения технологии в рамках конкретного процесса;
- ▶ целевое назначение в рамках конкретного процесса.

Специалистами Центра компетенций Национальной технологической инициативы “Новые производственные технологии” Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Центр НТИ СПбПУ) предложены следующие варианты типологизации термина:

- ▶ на основе момента появления Цифрового двойника относительно реального объекта или процесса;
- ▶ на основе уровня адекватности Цифрового двойника реальному объекту или процессу.

С точки зрения целей применения Цифровых двойников специалисты Центра НТИ СПбПУ выделяют следующие типы:

- ▶ **Информационно-диагностические Цифровые двойники.** Обеспечивают мониторинг, сортировку и анализ инцидентов, идентифицируют сбои, ошибки, нештатное поведение объекта/системы/процесса.
- ▶ **Предиктивные Цифровые двойники.** Прогнозируют будущее поведение объекта/системы/процесса в различных условиях.
- ▶ **Качественные Цифровые двойники.** Позволяют на стадии проектирования и разработки продукта предотвратить производственные неудачи и сэкономить финансовые, временные и иные ресурсы.
- ▶ **Операционные Цифровые двойники.** Способствуют прозрачности и оптимизации производственных и/или бизнес-процессов в компании или на предприятии.

В настоящей статье, говоря о Цифровом двойнике изделия (газотурбинного двигателя (ГТД)) будем определять его следующим образом – это система систем, ядром которой является цифровая мультидисциплинарная математическая модель двигателя, разработанная в рамках модельно-ориентированного системного инжиниринга (Model Based Systems Engineering, MBSE) с использованием best-in-class-технологий и на основе многоуровневой матрицы требований, целевых показателей и ресурсных ограничений и позволяющая проверять ключевые контроли-

руемые параметры разработки в зависимости от изменения различных факторов, а также предоставляющая возможность исследовать физические проблемы и прогнозировать техническое состояние объекта.

К ключевым параметрам ГТД можно отнести его стоимость, массу, прочность и ресурс, основные термодинамические характеристики. Обеспечение оптимальных показателей каждого из параметров определяет конкурентоспособность изделия на рынке.

Цифровой двойник ГТД

Реализация Цифрового двойника ГТД предполагает наличие следующих неотъемлемых системных компонентов:

- ▶ **системы администрирования данных.** Включает в себя внешний пользовательский интерфейс, а также структуру кодов для интеграции данных;
- ▶ **системы хранения данных;**
- ▶ **системы вычислительных ресурсов.** Включает в себя программное обеспечение и вычислительные мощности;
- ▶ **системы базы знаний.** Включает в себя информацию об изделии, банк материалов, спецификацию, исходные данные, перечень контролируемых параметров, перечень методик расчетов и проч.;
- ▶ **системы математических моделей.** Включает в себя модули основных расчетов, модуль верификации, модуль валидации.

Очевидно, что каждый компонент требует тщательной разработки, а

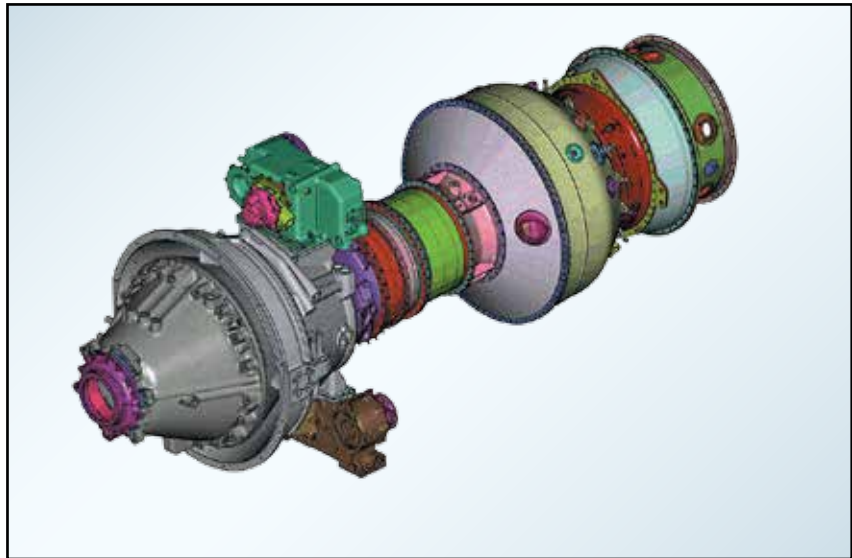
также отладки входов и выходов для организации связей между отдельными системами и подсистемами.

Проект указанного масштаба выходит далеко за рамки типовых расчетно-конструкторских работ, а значит, с учетом установленных на реализацию сроков должен осуществляться в ходе совместной деятельности конструкторских подразделений организации, отдела информационных технологий и сторонних научно-исследовательских центров, обладающих необходимыми компетенциями.

Пилотный проект по созданию Цифрового двойника ГТД был осуществлен в АО «ОДК-Климов». В качестве соисполнителя по проекту ТВ7-117СТ-01 и основного исполнителя по проекту «Цифровой двойник ТВ7-117СТ-01» выступил Центр НТИ СПбПУ. Выбор пилотного проекта был сделан с учетом следующих критериев:

- ▶ **актуальность изделия.** Двигатель ТВ7-117СТ-01, предназначенный для применения в составе силовой установки разрабатываемого гражданского самолета ИЛ-114-300, приближается к этапу сертификации, следовательно, некоторые решения, полученные с помощью Цифрового двойника, могут быть использованы в качестве доказательной базы (расчетного обоснования);
- ▶ **наличие комплекта конструкторской документации и полного состава электронных моделей;**
- ▶ **наличие экспериментальных данных для верификации.** Двигатель ТВ7-117СТ-01 создан на базе сертифицированного серийного двигателя ТВ7-117С(СМ) с преемственностью основных узлов, что позволяет использовать материалы базовой машины в качестве экспериментального ресурса для ее модификаций;
- ▶ **наличие экспериментальных данных для валидации.** Опытные образцы двигателя ТВ7-117СТ-01 имеют стендовую и летную разработку.

Помимо прочего, единожды разработанный Цифровой двойник



Цифровой двойник ТВ7-117СТ-01. Каркасная модель корпусной системы двигателя

ТВ7-117СТ-01 может быть использован для решения широкого круга задач всего семейства двигателей ТВ7-117: на этапе сертификации, при получении одобрения главного изменения (ОГИ), при анализе возможности применения на других летательных аппаратах (ЛА), модернизации и т.д. Поскольку все семейство двигателей ТВ7-117, разрабатываемых под нужды как вертолетной, так и транспортной самолетной отраслей промышленности, имеет общий базовый газогенератор, Цифровой двойник с валидацией по результатам испытаний двигателей по одному проекту может быть использован для проведения виртуальных испытаний других изделий.

Ключевой инструмент разработки: CML-Цифровая платформа CML-Bench

Цифровые двойники позволяют компаниям создавать в кратчайшие сроки глобально конкурентоспособную продукцию нового поколения и управлять изменениями на всех последующих стадиях жизненного цикла. Однако разработка Цифровых двойников требует применения новых подходов и технологий, включая специализированные цифровые платформы, многоуровневые матрицы целевых показателей и ограничений, виртуальные стенды и

виртуальные полигоны и, конечно, инженерные компетенции мирового уровня.

Сотрудниками Инжинирингового центра «Центр компьютерного инжиниринга» СПбПУ Петра Великого (Инжинирингового центра СПбПУ), ключевого подразделения Центра НТИ СПбПУ, создана CML-Цифровая платформа CML-Bench – платформа разработки Цифровых двойников и система управления процессами цифрового проектирования, математического моделирования и компьютерного инжиниринга.

CML-Bench значительно упрощает обработку массивов данных (Smart Big Data) независимо от отрасли, автоматизирует процесс виртуальных испытаний, в том числе на специализированных виртуальных стендах и виртуальных полигонах.

Цифровая платформа CML-Bench предназначена для:

- ▶ формирования многоуровневой матрицы требований/целевых показателей и ресурсных ограничений (временных, финансовых, интеллектуальных, экологических, технологических/производственных и т.д.);
- ▶ разработки математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным материалам, конструкциям/машинам/агрегатам/механизмам/приборам/установкам/сооружениям и т.д.;

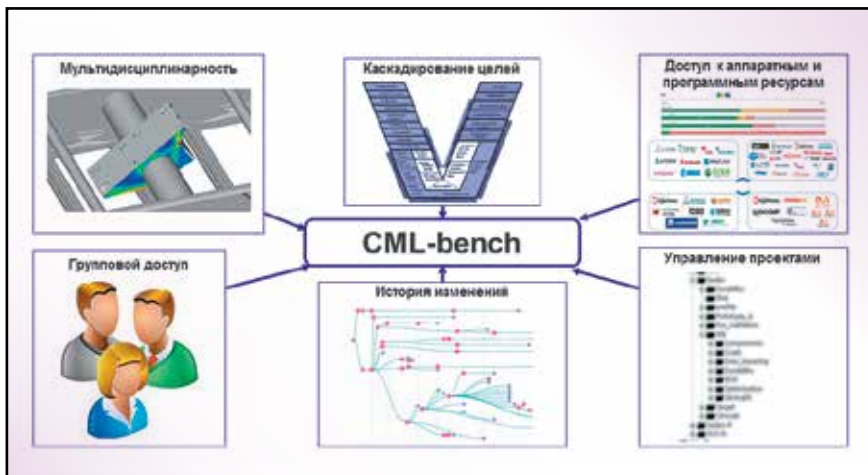


Рис. 1. CML-Bench – единая платформа разработки Цифровых двойников

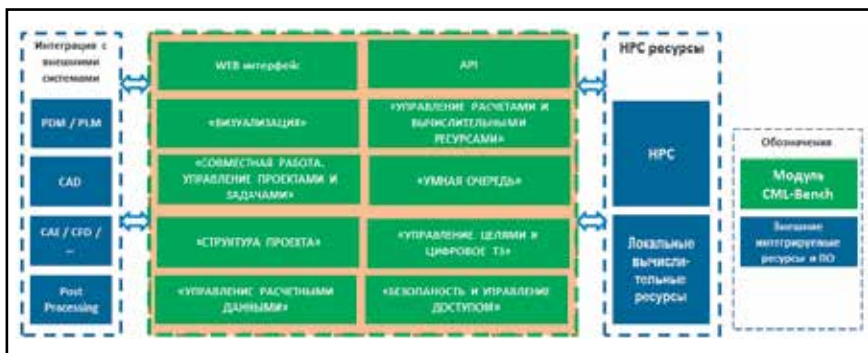


Рис. 2. Структура модулей платформы CML-Bench



Рис. 3. Непрерывный мониторинг выполнения требований на всех уровнях

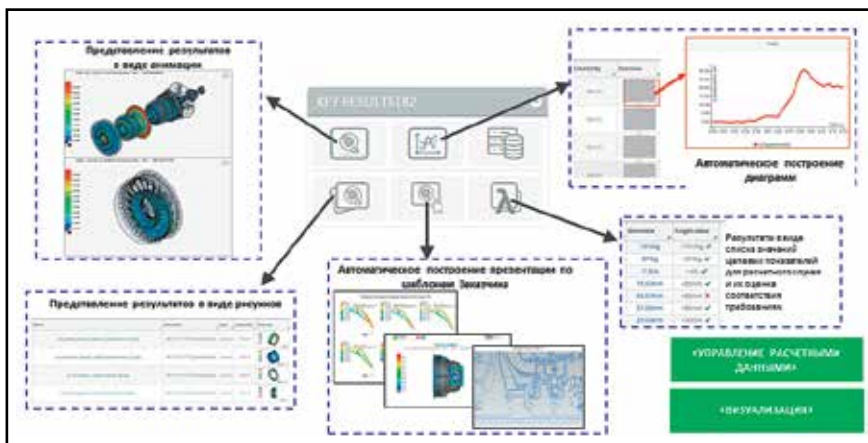


Рис. 4. CML-Bench. Пример представления результатов

- ▶ выполнения виртуальных испытаний;
- ▶ разработки виртуальных стендов и виртуальных полигонов, выполнения на них виртуальных испытаний;
- ▶ разработки Цифровых двойников (Digital Twin) и умных Цифровых двойников (Smart Digital Twin) (рис. 1);
- ▶ автоматизации выполнения инженерных расчетов;
- ▶ сбора, обработки, каталогизации моделей и расчетных вариантов;
- ▶ подготовки сборочных файлов;
- ▶ мониторинга, обработки и визуализации результатов инженерных вычислений, эволюции различных показателей/характеристик материалов, изделий, конструкций и процессов, а также технологических/производственных ограничений на всех этапах жизненного цикла.

Цифровая платформа CML-Bench в качестве ядра содержит SPDM-систему, позволяющую автоматизировать выполнение инженерных расчетов, структурировать все расчетные модели и варианты, упростить работу с базой данных расчетных моделей, результатов вычислений и расчетных вариантов, а также улучшить возможность представления и сравнения результатов инженерных работ.

CML-Bench обеспечивает интеграцию десятков разнообразных CAD/CAE-программных систем мирового уровня, используемых в инженерно-конструкторских разработках для выполнения инженерных и расчетных работ на различных стадиях подготовки и проведения численного моделирования, виртуальных испытаний и обработки результатов вычислений (рис. 2).

Применение CML-Bench позволяет осуществлять мониторинг всех изменений конструкторских решений, эволюцию и модификацию всех расчетных моделей, субмоделей и расчетных вариантов, а также обеспечивает четкую связь между самим расчетным вариантом и результатами расчета. Это позволяет контролировать, сравнивать и наглядно визуализировать результаты цепочек вычислений, выполненных при

математическом моделировании и оптимизации изделий или конструкций (рис. 3).

Платформа предоставляет также возможность контролировать происхождение и историю изменений каждого вычислительного результата, всех виртуальных испытаний, которых за сутки может быть сотни или даже тысячи (в случае одновременного выполнения десятков проектов). Например, можно легко сравнивать результаты расчетных вариантов с соответствующими вариантами геометрической или расчетной модели, свойствами, нагрузками, материалами, использованными в расчетах, анализировать результаты экспериментов по разработанным алгоритмам и т.д. (рис. 4)

Цифровая платформа CML-Bench представляет собой клиент-серверное web-приложение, состоящее из пользовательского интерфейса, серверной части, системы управления базами данных и сервиса-решателя:

► **серверная часть.** Осуществляет взаимодействие с системой управления базами данных, обработку пользовательских запросов, запуск и остановку вычислительных задач, оповещение пользователей;

► **клиентская часть.** Представляет собой интерфейс пользователя, который доступен через web-браузер и позволяет выполнять все операции согласно функциональным требованиям;

► **сервис-решатель.** Является отдельным приложением, которое размещено на расчетных высокопроизводительных кластерах и осуществляет запуск вычислительных задач.

Платформа служит для интеграции интеллектуальной, программ-



Рис. 5. Интеллектуальное управление ресурсами через CML-Bench



Рис. 6. Схема потоков данных Цифрового двойника двигателя ТВ7-117СТ-01

ной и вычислительной инфраструктуры всех участников процесса разработки и производства изделий и конструкций (исполнителей и заказчиков – разработчиков, проектировщиков, инженеров и производителей) (рис. 5).

Задача по созданию Цифрового двойника ТВ7-117СТ-01 и оптимизация

Центральным компонентом Цифрового двойника газотурбинного двигателя является его

термодинамическая модель. Тесное сотрудничество между специалистами АО «ОДК-Климов» и Центра НТИ СПбПУ позволило использовать многолетний опыт конструкторского бюро по созданию таких моделей для построения современной валидированной термодинамической модели двигателя ТВ7-117СТ-01, интегрированной в платформу CML-Bench. Данная модель позволяет получать основные параметры двигателя в режиме онлайн из страницы браузера, автоматически генерируя при этом исходные данные для запуска ресурсоемких трехмерных газодинамических, тепловых, прочностных и оптимизационных расчетов на суперкомпьютере (рис. 6).

Основой для функционирования такой модели, помимо большого количества существующих в АО «ОДК-Климов» расчетных и экспериментальных данных, стали почти полторы тысячи виртуальных трехмерных газодинамических испыта-

В процессе работы над проектом ведется постоянный диалог между специалистами АО «ОДК-Климов» и Центра НТИ СПбПУ. Данный опыт представляет собой пока не формализованный подход к совместной работе в форме так называемых зеркальных инжиниринговых центров, получивших в настоящее время широкое распространение за рубежом. Подобная практика нацелена на создание синергетического эффекта, без которого сложно рассчитывать на быстрый качественный переход к современным прорывным технологиям.

Всеволод Елисеев,
директор программы ТВ7-117 –
главный конструктор, АО «ОДК-Климов»

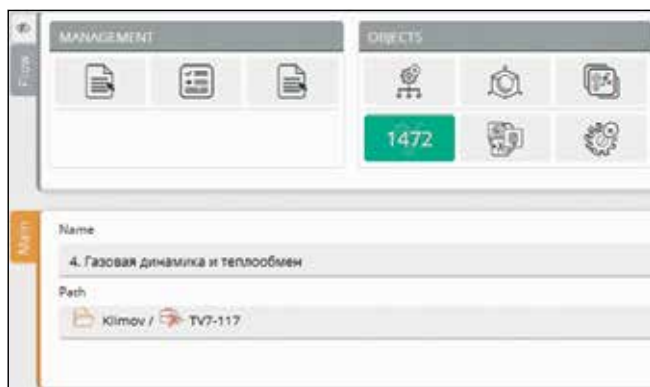


Рис. 7. Общее количество виртуальных газодинамических и тепловых испытаний по проекту двигателя ТВ7-117СТ-01

Достижение значительных результатов в столь сжатые сроки было обеспечено применением новой парадигмы проектирования, предполагающей комплексирование лучших в своем классе решений, создание Цифрового двойника всего изделия на основе матрицы целевых показателей и ограничений. Разработка Цифрового двойника газотурбинного двигателя – работа не одного этапа, однако сам факт появления таких технических заданий в отрасли – это уже значительное событие.

**Александр Тамм, руководитель отдела
кросс-отраслевых технологий,
Центр НИИ СПбПУ**

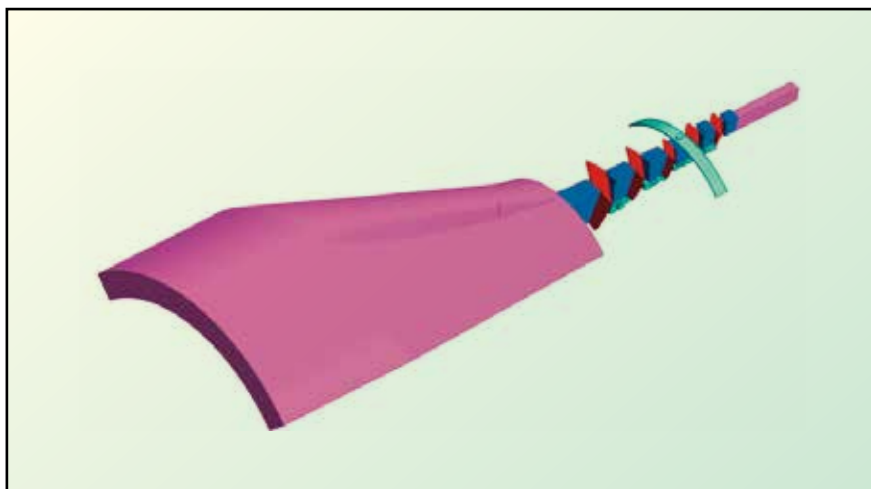


Рис. 8. Модель для виртуальных испытаний по определению аэродинамических характеристик компрессора

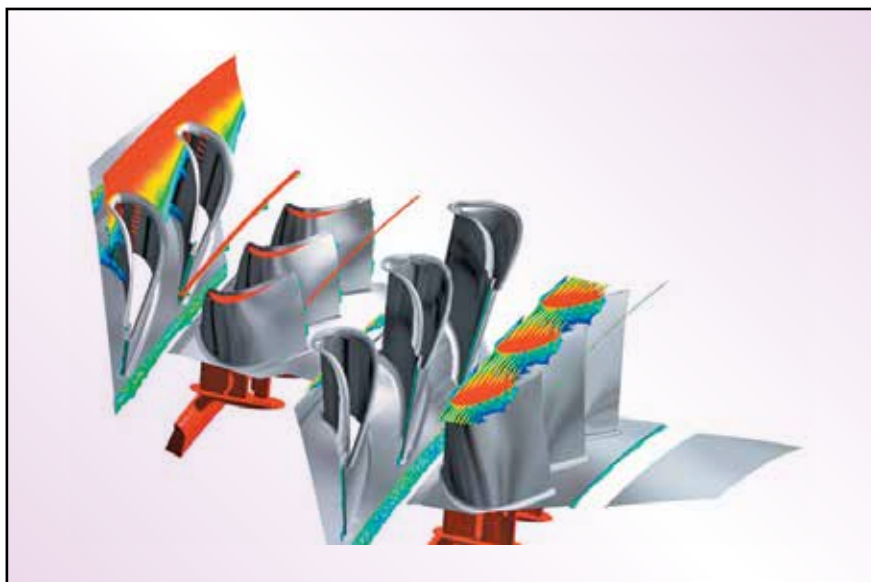


Рис. 9. Модель для виртуальных испытаний по определению аэродинамических характеристик турбины

ний (рис. 7) основных узлов двигателя (компрессора, камеры сгорания, турбин), проведенных на Цифровой платформе CML-Bench (рис. 8 и 9) с использованием мощностей Суперкомпьютерного центра “Политехнический”.

Основанная на виртуальных и натуральных испытаниях модель двигателя позволила достоверно оценивать самые тяжелые режимы его работы. Такая оценка необходима для корректного определения термических нагрузок, воздействующих на двига-

тель, и для последующей передачи этих данных в расчеты напряженно-деформированного состояния и ресурса деталей двигателя. Определение теплового состояния деталей двигателя ТВ7-117СТ-01 осуществлялось путем полномасштабных сопряженных газодинамических и тепловых виртуальных испытаний основных узлов двигателя с размерностью конечно-элементных моделей более 200 млн элементов (рис. 10). Данные модели были валидированы по обобщенным экспериментальным данным АО “ОДК-Климов”. Отклонения виртуальных испытаний от натуральных по температурам лопаток и дисков турбин не превысили 5%.

На основе достоверных входных данных о тепловом состоянии, полученных из валидированных расчетов сопряженной газодинамики и теплообмена, проведены десятки виртуальных испытаний прочности статора двигателя. Модульная математическая модель двигателя позволяет проводить анализ условий работы статора и ротора при рабочих и экстремальных режимах эксплуатации, включая предельные случаи (например, анализ удержания корпусом оборванной лопатки), а также исключает вероятность ошибки при переносе данных из поверочных расчетов в задачи оптимизации, так как взаимосвязи автоматизированы.

Результаты всех виртуальных испытаний ГТД на рабочих режимах дополняют матрицу целей и ограничений изделия значениями коэффициентов запаса по прочности и усилий в болтовых соединениях, статусов контактов между фланцами и т.п. (рис. 11). Количественные характеристики различных ревизий конструкции ГТД представлены в

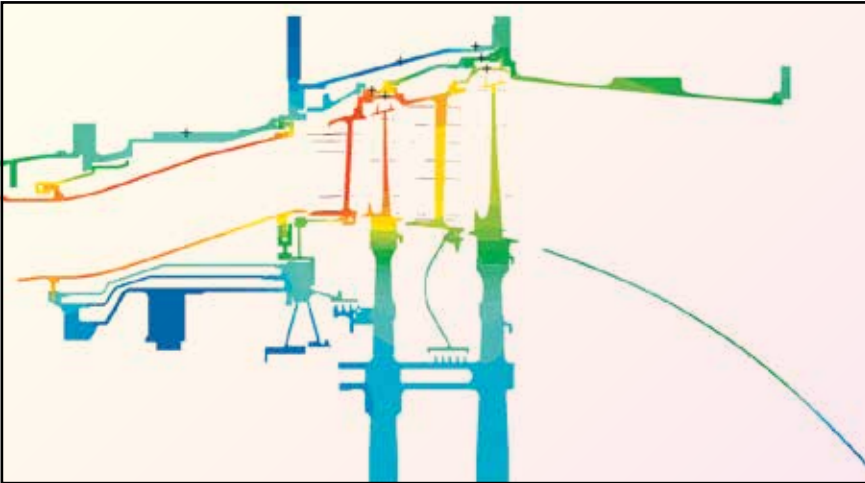


Рис. 10. Модель для виртуальных испытаний по определению теплового состояния турбины

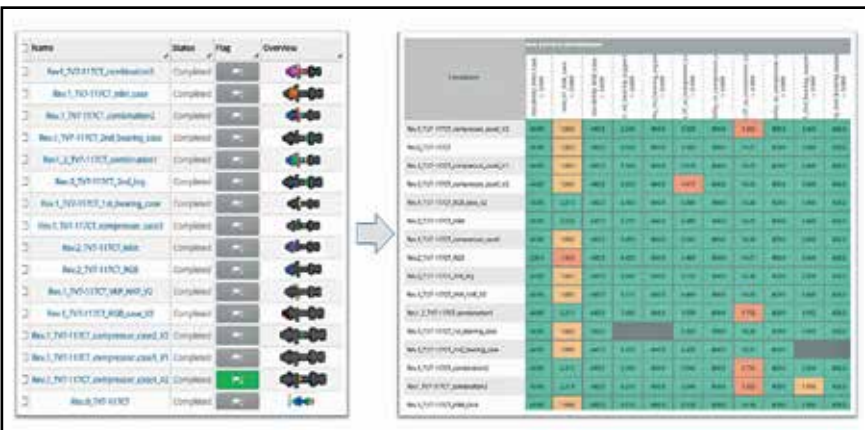


Рис. 11. Дополнение матрицы целей и ограничений данными виртуальных испытаний

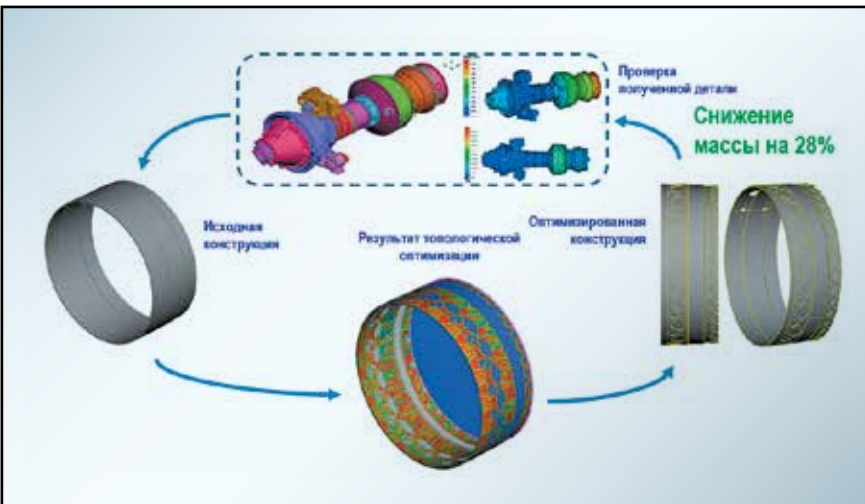


Рис. 12. Схема процесса оптимизации обечайки корпуса компрессора

виде таблиц с цветовой индикацией достижения целевых значений. Так, например, в процессе оптимизации холодной части двигателя при варьировании ревизий одной из деталей компрессора выявлено врезание лопатки турбины в корпус. Данное наблюдение особенно ценно тем, что в традиционном процессе

проектирования вышеуказанное врезание могло быть обнаружено лишь по завершении крупного этапа разработки, когда происходит заморозка конструкции и сборка моделей, тогда как на Цифровой платформе CML-Bench подобные эффекты могут быть отслежены в режиме реального времени.

Оптимизация деталей корпуса двигателя произведена без “ручных” операций, то есть при задании граничных условий в автоматизированном режиме, что дало возможность исключить значительную часть допущений, традиционно применяемых при решении задачи минимизации массы отдельных деталей, а также позволило значительно увеличить количество эскизных вариантов конструкции, рассматриваемых профильным специалистом перед конструкторской проработкой. На рис. 12 представлен пример процесса оптимизации одного из корпусов двигателя.

Заключение

В настоящее время проект по созданию Цифрового двойника двигателя ТВ7-117СТ-01 находится на этапе верификации и валидации. Разработанные математические модели уточняются по результатам стендовых испытаний отдельных узлов и деталей, а также специальных стендовых прочностных испытаний узлов. Формируется пул новых инженерных задач-вызовов, таких как проверка влияния производственных отклонений в деталях на ключевые параметры двигателя, проверка влияния технологических процессов при производстве заготовок/деталей на конструкционные характеристики применяемых материалов, наполнение Цифрового двойника дополнительными расчетными методиками в соответствии с существующими отраслевыми нормами и стандартами.

Всеволод Елисеев, директор программы ТВ7-117 – главный конструктор, Александр Мусеев, начальник КБ расчетов, АО “ОДК-Климов”, Александр Тамм, руководитель отдела кросс-отраслевых технологий, Петр Гаврилов, заместитель руководителя отдела кросс-отраслевых технологий, Центр НТИ СПбПУ