

УДК 621.452.3:519.876.5

doi: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72

## Цифровые двойники — платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей

А.В. Сальников<sup>1</sup>, М.В. Гордин<sup>2</sup>, Ю.Н. Шмотин<sup>3</sup>, А.С. Никулин<sup>3</sup>,  
П.В. Макаров<sup>3</sup>, М.С. Французов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана

<sup>3</sup> АО «ОДК»

## Digital Twins — a Platform for Aircraft Engine Lifecycle Management

A.V. Salnikov<sup>1</sup>, M.V. Gordin<sup>2</sup>, Yu.N. Shmotin<sup>3</sup>, A.S. Nikulin<sup>3</sup>,  
P.V. Makarov<sup>3</sup>, M.S. Frantsuzov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Central Institute of Aviation Motors

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University

<sup>3</sup> United Engine Corporation

Рассмотрены общая концепция цифрового двойника газотурбинного двигателя и способы его применения. Важной частью цифрового двойника является матрица требований, которая состоит из структурированных, формализованных и преобразованных в базу данных требований, предъявляемых к газотурбинному двигателю. С учетом этой матрицы в цифровой двойник вносят группы математических моделей разного уровня сложности, с помощью которых будет осуществляться проверка выполнения требований и прогнозирование работы двигателя. Цифровой двойник базируется на цифровой платформе, объединяющей все его компоненты, организует взаимосвязь между ними, формирует их иерархию, обеспечивает хранение истории изменений и взаимодействие с различными базами данных (внутренними на предприятии и внешними отраслевыми), сторонними цифровыми платформами и сервисами, используемыми на разных этапах жизненного цикла с учетом их специфики. Применение технологии цифровых двойников позволяет объединить в единое информационное пространство все требования, предъявляемые к разрабатываемым математическим моделям, различные цифровые сервисы и данные создаваемые, получаемые и используемые в течение жизненного цикла газотурбинного двигателя. Это объединение повысит прозрачность и понимание того, что происходит с двигателем на различных этапах его жизненного цикла, улучшит характеристики, сократит время разработки и сертификации, а также себестоимость его производства и эксплуатации.

**Ключевые слова:** цифровой двойник, газотурбинный двигатель, матрица требований, цифровая платформа, жизненный цикл, математическое моделирование

The article describes the general concept of digital twin (DT) of gas turbine engine (GTE) and methods of its application. A significant part of the digital twin is the requirement matrix (MoR), consisting of requirements for a gas turbine engine structured, formalized and transformed into a database. Considering the MoR, the groups of mathematical models of different degrees of complexity are introduced into the digital twin, allowing inspection of fulfilling requirements and predicting the engine operation. The digital twin is based on a digital platform uniting all its components, it organizes the interfaces between them, forms their hierarchy, stores the revision history and interacts with various databases (internal at

the enterprise and external sector-specific ones), third-party digital platforms and services used at different life cycle stages, taking into account their specific features. The use of digital twin technology allows combining into a common information space the complete scope of requirements for the mathematical models being developed, various digital services and a variety of data created, received and used throughout the life cycle of a gas turbine engine. Such combination will increase transparency and understanding what happens to the engine at various stages of its life cycle, improve performance, reduce time for developing and certification, and reduce the prime cost of its production and operation.

**Keywords:** digit twin, gas turbine engine, requirement matrix, digital platform, life cycle, mathematical modeling

Повышение требований, предъявляемых к характеристикам газотурбинного двигателя (ГТД), и ужесточение ограничений приводит к усложнению их конструкции и условий эксплуатации. По этой причине процесс испытаний и сертификации ГТД становится все более трудозатратным и длительным, что в случае неудовлетворительных результатов может привести к срыву сроков выхода изделия на рынок. Поэтому важной задачей является снижение времени доводки и сертификации ГТД, а также повышение вероятности получения требуемых характеристик двигателя в ходе его испытаний и эксплуатации [1].

Развитие математического моделирования и рост вычислительных мощностей приводит к все большему внедрению на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) авиационных ГТД и силовых установок цифровых технологий и связанных с ними подходов. Цифровые технологии условно можно подразделить на две группы: математическое моделирование и автоматизация процессов. На каждом из этапов ЖЦ ГТД эти группы технологий активно используются и взаимодействуют друг с другом.

В общем случае основной задачей математического моделирования является конкретизация конструкции изделия в процессе проектирования и прогнозирования характеристик ГТД, его систем, узлов, деталей и сборочных единиц (ДСЕ) в условиях испытаний и эксплуатации. Также в последнее время инструменты математического моделирования (аддитивные технологии, литье, сборка изделия и т. д.) активно используются для анализа и прогнозирования технологических процессов, применяемых при производстве ГТД.

Основной целью автоматизации является замена (частичная или полная) деятельности специалистов работой программных алгоритмов или роботизированных систем в повторяющихся процессах, не связанных с принятием

решений. В результате этой замены уменьшается время и стоимость, повышается качество процессов, реализуемых в ходе ЖЦ изделия.

Для этих целей в авиационном двигателестроении создано (и продолжает активно разрабатываться) большое количество специализированного программного обеспечения (ПО), различных автоматизированных систем сбора, обработки и хранения информации, а также множество технологий автоматизации и роботизации технологических процессов, связанных с проектированием, испытаниями, производством и эксплуатацией ГТД.

Объединение в рамках единого цифрового пространства всего спектра цифровых технологий и совокупности данных, применяемых и получаемых в ходе ЖЦ конкретного ГТД, является важной и актуальной задачей, однако труднореализуемой из-за сложности конструкции и процесса эксплуатации современных авиационных двигателей. Перспективным направлением для решения этой задачи может стать развитие и использование технологии цифровых двойников (ЦД) [2].

Цель работы — описание общей концепции ЦД авиационного двигателя, его структуры, назначения и способов применения составляющих элементов.

**Общая концепция ЦД ГТД.** Одним из первых концепцию ЦД представил М. Гривс в 2002 г. [3]. Согласно его концепции, ЦД базируется на тесной связи между математическими моделями (ММ) изделия (виртуальный мир) и различными видами данных, получаемых напрямую из физических систем (или процессов) в ходе их испытаний и эксплуатации (реальный мир). Это объединение в рамках ЦД способно обеспечить своевременный анализ данных на всех этапах ЖЦ изделия, чтобы предотвратить или обойти большинство проблем до их возникновения.

С момента первого появления концепция ЦД непрерывно эволюционировала, поэтому в литературе можно найти большое количество разных часто противоречивых определений термина «цифровой двойник» [4–7]. Через несколько лет М. Гривс ввел понятие ЦД как совокупности информации, которая сочетает все данные об объекте, начиная от его общей геометрии и заканчивая описанием поведения объекта в реальном мире с помощью ММ [8].

В работе [9] Р. Розен также рассуждает о двух пространствах (физическом и виртуальном). Оперативное сопоставление данных, получаемых из них, позволяет анализировать условия, в которых находится объект, прогнозировать его поведение и своевременно принимать решения. Позже в своих работах автор добавил к данным алгоритмы, описывающие поведение и принимающие решение на разных стадиях ЖЦ изделия [10].

Еще совсем недавно ЦД реального объекта определялся как виртуальное зеркало, которое может всесторонне описывать физические и функциональные свойства продукта на протяжении всего его ЖЦ и дает возможность обмениваться информацией между продуктом и его виртуальным зеркалом [11]. Долгое время термин «цифровой двойник» определялся как виртуальная копия физического явления, процесса или системы, используемая для принятия решений [12]. Другие концепции ЦД утверждают, что он содержит совокупность технологий сбора данных и прогнозирования поведения объекта на их основе, что позволяет установить связь между реальным физическим продуктом и виртуальным пространством [13].

В 2022 г. выпущен ГОСТ Р 57700.37–2021 по ЦД изделий [14], в котором дано следующее определение: ЦД изделия — это система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с ним (при наличии изделия) и (или) его составными частями. При этом цифровая модель изделия определяется как система математических и компьютерных моделей, а также его электронных документов, описывающая структуру, функциональность и поведение разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях ЖЦ, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504–81 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям.

Проблема многообразия, неоднозначности трактовок и концепций ЦД актуальна и для области авиационного двигателестроения. Каждый этап ЖЦ ГТД (проектирование, испытания, производство, эксплуатация и т. д.) имеет специфические особенности и значительно отличается от других. По этой причине цифровые технологии, применяемые на разных этапах, также имеют свои особенности и существенные различия. Наличие этой специфики порождает множество представлений, трактовок, концепций и пониманий того, чем может и/или должен быть ЦД.

Для этапа проектирования актуально прогнозирование характеристик двигателя, его систем, узлов и ДСЕ с использованием ММ разного уровня сложности [15]. Поэтому специалисты, связанные с разработкой ГТД, могут понимать под ЦД технологию интеграции в едином информационном пространстве множества применяемых методик проектирования и совокупности 0D-, 1D-, 2D-, 3D-моделей САЕ (а также их эволюцию), описывающих работу двигателя и его отдельных элементов.

В более частном случае под ЦД можно понимать некоторую единую итоговую САЕ-модель изделия (иногда объединенную совокупность САЕ-моделей). Эта модель может быть как упрощенной (1D или 2D), так и сложной (3D) многодисциплинарной, описывающей все процессы, протекающие в изделии (зависящие и независимые от времени).

На этапе испытаний и сертификации важно успешно спрогнозировать с помощью математического моделирования результаты экспериментов, а также автоматизировать процессы проведения испытаний, сбора, обработки, архивирования и анализа экспериментальных данных. Поэтому некоторые специалисты под технологией ЦД могут понимать совокупность виртуальных стендов и полигонов, которые являются высокоточными верифицированными и валидированными многодисциплинарными моделями [16], описывающими каждое испытание с учетом специфики испытываемого объекта и испытательного стенда [17].

В процессе эксплуатации применяют упрощенные 1D-модели ГТД и его отдельных элементов, а также множество данных, получаемых в ходе эксплуатации. Поэтому специалисты, связанные с этим этапом, под ЦД понимают некоторую упрощенную вычислительную модель (или несколько моделей) и методик ее использо-

вания, позволяющую быстро обобщать множество данных, поступающих с эксплуатации всей серии конкретного двигателя, оперативно анализировать их, понимать и прогнозировать его техническое состояние путем сопоставления данных (он- и оффлайн), поступающих с этого экземпляра и со всей серии [18, 19].

Таким образом, формируется множество различных представлений о ЦД двигателя, базирующихся в основном на отдельных этапах его ЖЦ, но не охватывающих весь спектр цифровых технологий, применяемых в течение ЖЦ и не анализирующих конкретный двигатель как единый объект на всех этапах его существования.

Обобщенная схема ЖЦ типового сложного технического объекта (ТО) показана на рис. 1, где ТЗ — техническое задание. Любой ТО начинает существовать с формирования совокупности различных требований к нему, их анализа, обобщения, формализации и объединения в единую многоуровневую систему требований (матрицу требований — МТ).

Помимо описания планируемых характеристик ТО эти требования регламентируют каждый этап его ЖЦ (разработку, испытания, производство, эксплуатацию и т. д.), учитывают требования законодательства и других регламентирующих органов и т. п. При этом система требований может модифицироваться в течение ЖЦ изделия (особенно в процессе разработки).

Так как данная система требований регламентирует весь ЖЦ ТО, наиболее удобно и корректно формировать концепцию и терминологию ЦД, отталкиваясь от МТ и совокупно-

сти цифровых технологий, применяемых для их удовлетворения в процессе разработки и эксплуатации конструкции, а не от специфики отдельного этапа ЖЦ изделия.

Таким образом, в общем случае структура ЦД формируется на базе простого принципа: для каждого предъявляемого к изделию требования необходимо разработать ММ, которая проверяет возможность его выполнения. На базе этого подхода можно сформулировать следующее упрощенное определение: ЦД — это совокупность ММ (CAD, CAE, CAM и т. д.) и других цифровых технологий, интегрированных в единую цифровую платформу (ЦП), которые позволяют во всем спектре МТ оперативно отвечать на три вопроса.

1. Что происходит с изделием сейчас?
2. Что сделать с изделием, чтобы добиться нужных характеристик при изменении требований?
3. Что будет, если внести в изделие какие-либо модификации, неправильно эксплуатировать или допустить ошибки при производстве?

Для ответа на первый вопрос необходимо для каждого предъявляемого требования из МТ разработать, верифицировать и валидировать с использованием результатов специальных испытаний совокупность ММ. Целью ММ является оперативная проверка выполнения требования без проведения эксперимента.

Однако проверка не означает подтверждение. Это дополнительный инструмент, который позволяет предварительно оценить правильность принятых решений, перед проведением испытания, и в некоторых случаях отказаться

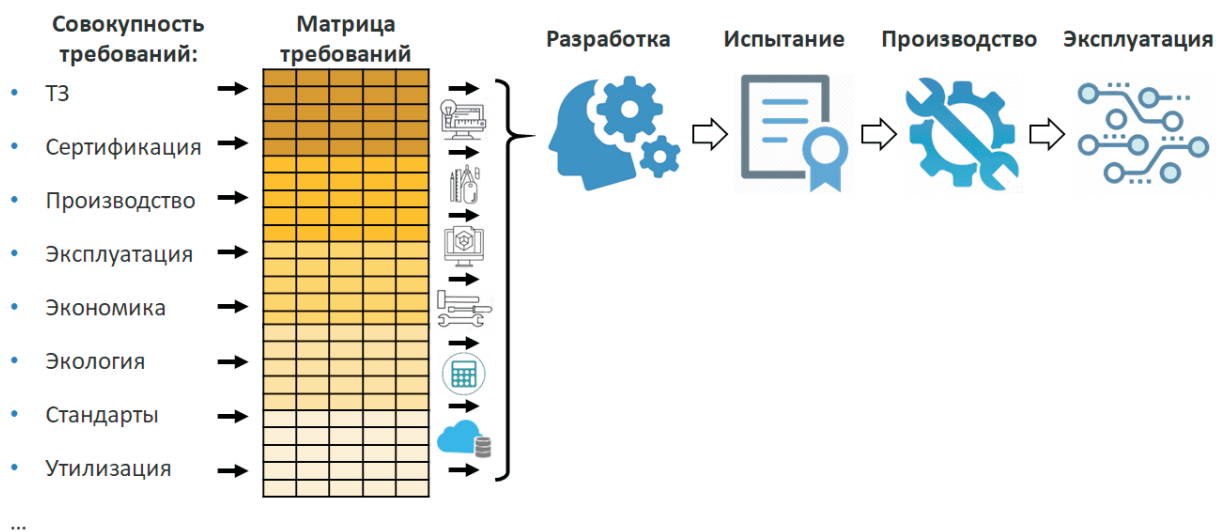


Рис. 1. Обобщенная схема ЖЦ сложного ТО

от тупиковых (по результатам моделирования) модификаций конструкции или условий его производства, эксплуатации и т. д.

При этом в разных случаях для проверки одного требования может потребоваться несколько моделей и, наоборот, с помощью одной ММ можно проверить сразу несколько требований. Также не для всех требований необходимо использовать полноценные многодисциплинарные 3D-модели, реализующие прямое моделирование работы узла или двигателя.

Иногда для проверки требования достаточно упрощенной вычислительной 1D- или 2D-модели. Однако для авиационных ГТД вследствие сложности протекающих в них процессов, высокой стоимости и длительности испытаний актуальна разработка, верификация и валидация высокодостоверных многодисциплинарных 3D-моделей для проверки требований, связанных с экспериментальным подтверждением характеристик.

В то же время из-за высокой сложности устройства и работы ГТД использование математического моделирования для прямой проверки многих требований без проведения эксперимента не всегда возможно, так как либо еще не разработан достоверный математический аппарат, либо затраты и сроки, связанные с применением математического моделирования, сопоставимы (или больше) с проведением испытаний. При этом снова появляется задача верификации и валидации таких массивных САЕ-моделей, вследствие чего математическое моделирование не заменяет испытания, а дополняет их, параллельно обогащаясь результатами экспериментов.

Для оперативного ответа на второй и третий вопросы помимо совокупности верифицированных и валидированных ММ необходимо в рамках ЦП структурировать, формализовать и автоматизировать (хотя бы частично) логику проектирования и эволюцию ММ от упрощенных (1D) до многодисциплинарных (3D).

Это связано с тем, что модификации (даже незначительные), вносимые в конструкцию или работу одного узла (или даже детали), могут значительно повлиять на работу всего двигателя, что может привести к необходимости локального перепроектирования и нового расчетного согласования работы всех его систем и узлов. Для этого необходимо оперативно вернуться на этап эскизного проекта, быстро провести глобальный расчетный анализ влияния вносимых изменений

на работу всего двигателя, каждой его системы и узла, и в случае необходимости реализовать локальное перепроектирование несогласованного узла или детали.

Чтобы совершать эту процедуру регулярно, необходимо быстро и корректно параметризовать применяемые ММ и автоматизировать процессы их модификации, анализа и взаимодействия между собой. Кроме того, для поиска оптимальных с точки зрения новых требований (обычно более жестких) конструкций следует использовать методы многокритериальной и многодисциплинарной оптимизации совместно с интуитивными подходами, основанными на личном опыте. Также следует автоматизировать и параметризовать САД-модели, чтобы оперативно изменять технологическую и конструкторскую документацию модифицируемого ГТД.

В ходе ЖЦ реального изделия для быстрого ответа на три поставленных вопроса необходимо использовать как ММ, так и результаты испытаний и статистические данные с производства и эксплуатации рассматриваемого двигателя и подобных ему аналогов. Поэтому в технологию ЦД также должны входить цифровые технологии интеграции с другими технологическими и информационными платформами, разрабатываемыми, получаемыми и применяемыми на всех этапах ЖЦ изделия.

Таким образом, можно дать следующее более сложное определение: ЦД ГТД — единая информационная система, содержащая совокупность разноуровневых ММ (САД, САЕ, САМ и т. д.), описывающих работу двигателя, объединенную с ней многоуровневую МТ, структурированную логику проектирования изделия, базы данных (БД) с информацией от каждого этапа ЖЦ изделия, а также документооборот, связанный с ним.

Эта система должна обеспечивать взаимосвязь и преемственность между моделями, верификацию, валидацию и интеграцию между моделями, данными и технологическими и информационными платформами, разрабатываемыми, получаемыми и используемыми на всех этапах ЖЦ ГТД: разработка, испытания, сертификация, изготовление, эксплуатация (в том числе и сервисное обслуживание) и утилизация. Система базируется на модульной ЦП, каждый модуль которой соответствует основным этапам ЖЦ изделия и интегрирует модели, данные и документы с учетом специфики этапа.

**Функциональная схема ЦД ГТД.** Обобщенная функциональная схема ЦД ГТД приведена на рис. 2, где ЛА — летательный аппарат; НИР — научно-исследовательская работа; РКД — рабочая конструкторская документация; ROM — постоянное запоминающее устройство. Условно в этой схеме можно выделить три этапа:

- предварительный анализ целей и возможностей;
- создание, верификация и валидация ЦД;
- применение ЦД на последующих этапах ЖЦ двигателя.

Также внутри ЦД можно условно выделить несколько областей, связанных с различными этапами его ЖЦ: разработкой, испытаниями, производством и эксплуатацией.

**Предварительный анализ целей и возможностей.** Началу разработки любого двигателя предшествует этап предварительного определения и согласования целевых характеристик и ограничений, которые будут предъявляться к изделию. Кроме того, проводится анализ экономической ситуации, геополитической обстановки, юридических аспектов, экологии, возможности появления новых или изменение (в основном ужесточение) старых требований и множества других аспектов, которые способны повлиять на регулирование ЖЦ изделия.

Цели, требования и ограничения, анализируемые на предварительном этапе, почти всегда имеют противоречивый характер, т. е. удовлетворение одних требований приводит к нарушению других. Для балансировки желаемого и

возможного проводят обликосое проектирование, в ходе которого применяют различные концептуальные и количественные методики, анализируют опыт разработки и эксплуатации подобных изделий.

Двигатель рассматривают во всех необходимых контекстах, начиная от оценки возможных направлений эволюции рынка, анализа ГТД в составе различных летательных аппаратов и заканчивая учетом физиологии и психологии пилота. При этом используют множество простых 0D–1D-моделей (в том числе и эмпирических), которые больше описывают анализируемые контексты (дисциплины анализа), чем ГТД.

Параллельно ведутся различные НИР, целью которых является анализ всех возможных технологий, формирование перечня критических элементов технологий, требуемых для реализации «желаемых» целей, и доведения этих технологий до нужной степени готовности.

Три описанных направления тесно связаны друг с другом, так как на первом ставятся задачи, на втором происходит их согласование, а на третьем обобщенно исследуются возможности решения поставленных задач и пути осуществления полученных решений. Реализация сформированных решений воплощается уже в ходе разработки и эксплуатации конкретного двигателя.

По итогу предварительного этапа формируется многоуровневая МТ, которая будет регламентировать ЖЦ будущего ГТД и станет от-



Рис. 2. Функциональная схема ЦД ГТД

правной точной для его ЦД. Кроме того, определяется перечень технологий и требуемый уровень их готовности, которые необходимо применять в процессе ЖЦ двигателя.

**Описание элементов функциональной схемы ЦД ГТД.** Цифровой двойник разрабатываемого изделия начинает формироваться на самых ранних этапах проектирования и базируется на ЦП — специализированном ПО, которое объединяет все компоненты ЦД, организует взаимосвязь между ними, формирует их иерархию, обеспечивает хранение истории изменений и взаимодействие с различными БД (внутренними на предприятии и внешними отраслевыми) и сервисами, используемыми на всех этапах ЖЦ изделия.

Так как этапы ЖЦ изделия значительно отличаются друг от друга с точки зрения содержания используемых моделей, природе получаемых данных и структуре применяемых инструментов, ЦП должна иметь модульную структуру, где модули соответствуют и учитывают специфические особенности этапов ЖЦ изделия с помощью специализированных интерфейсов.

Разработка и использование ЦД на основе ЦП, требующие значительных вычислительных мощностей, базируются на инфраструктуре информационных технологий разработчика изделия. ЦП должна содержать модуль администрирования вычислительных мощностей и модуль управления и учета деятельности сотрудников, занятых в создании и использовании ЦД изделия. Последний состоит из нескольких обобщенных модулей, для каждого из которых в ЦП разработан собственный программный инструментарий.

**Многоуровневая МТ.** Эта матрица включает в себя совокупность всех требований комплексного характера, которые предъявлены и могут предъявляться к ГТД, его узлам, системам и ДСЕ на всех этапах его ЖЦ (в том числе при различных модификациях изделия). МТ может меняться в ходе ЖЦ изделия, вследствие чего в ней могут появляться противоречивые и повторяющиеся требования. Поэтому ЦД должен содержать методики и инструментарий полуавтоматической гармонизации МТ и прозрачного анализа и управления МТ.

**Модуль проектирования ГТД.** В состав модуля проектирования ГТД входят структурированные и формализованные методики, по которым

осуществляется проектирование двигателя, его узлов, систем и ДСЕ, совокупность моделей разного уровня сложности, создаваемых в ходе проектирования, их эволюция и история проектирования (в том числе «тупиковые» ветви разработки). Модуль проектирования ГТД тесно связан с МТ и во многих случаях может изменять МТ в зависимости от результатов проектирования.

**Модуль цифрового сопровождения испытаний.** Этот модуль предназначен для расчетного прогнозирования успешности испытаний, проводимых с целью подтверждения заявленных характеристик ГТД и его сертификации. Поэтому в него входят высококачественные 3D-модели САД и САЕ (стационарные и нестационарные), которые отличаются от моделей, разрабатываемых и используемых на последних этапах проектирования, тем, что учитывают специфику испытаний и включают в себя соответствующие стенды.

Также модуль содержит методики разработки, верификации и валидации этих моделей, результаты испытаний, историю их подготовки и проведения, методики обоснования перед сертифицирующими организациями способов снижения объемов (или полной замены в случае простых ДСЕ) испытаний за счет моделирования и методики и специализированное ПО, используемые для взаимодействия и интеграции с ПО и сервисами средств проведения испытаний и БД.

Кроме того, в состав модуля цифрового сопровождения испытаний должен входить модуль управления стратегией сертификации, который на базе имеющегося опыта сертификации подобных изделий определяет оптимальную последовательность проведения сертификационных испытаний, необходимую и обоснованную степень сокращения объемов испытаний путем их математического моделирования.

**Модуль цифрового сопровождения эксплуатации.** Основная задача этого модуля — применение инструментов математического моделирования и других цифровых технологий для быстрого (иногда моментального) определения или прогнозирования характеристик ГТД в целом и отдельно каждой его системы, узла и ДСЕ (согласно МТ) в процессе его эксплуатации.



Для этого на последних этапах проектирования создают два типа моделей: сложные многодисциплинарные 2D–3D-модели для моделирования реальных или возможных случаев эксплуатации и упрощенные 1D-модели для прогнозирования и фактической (во многих случаях онлайн) оценки состояния ГТД, его систем, узлов и ДСЕ.

Сложные модели создают, чтобы разобраться в причинах отказов или поломки ГТД (или его системы, узла, ДСЕ) в ходе эксплуатации, а также для формирования множества расчетных эксплуатационных случаев, на базе которых в совокупности с большим объемом данных из реальной эксплуатации будет проводиться уточнение и отладка упрощенных моделей, а в некоторых случаях обучение с применением нейросетей. Разработанные таким образом простые модели часто получают аппаратную реализацию и применяют в качестве «виртуальных» датчиков и «счетчиков ресурса» непосредственно в полете.

Также данный модуль включает в себя методики разработки, верификации/валидации и последующего уточнения ММ, методики эксплуатации по техническому состоянию и прогнозированию технического состояния, методики и специализированное ПО, используемые для взаимодействия и интеграции с ЦП для средств, систем и сервисов, применяемых в ходе эксплуатации.

**Модуль конфигурации изделия.** Этот модуль содержит структурированную совокупность САД-моделей и их эволюцию в процессе проектирования, начиная от упрощенных обобщенных чертежей, создаваемых на этапе эскизного проекта, базовых трехмерных САД-моделей узлов и деталей, используемых на этапе технического проектирования, и заканчивая полноценной технической и конструкторской документацией итоговой конфигурации (состав, РКД, оцифрованные ДСЕ, сборки и т. д.).

Такой модуль хранит САД-модели, создаваемые в ходе производства опытных экземпляров, испытаний (в том числе отдельных узлов, систем и ДСЕ и испытательных установок) и серийного производства. Как и в случае САЕ-моделей, разрабатываемых и используемых при проектировании ГТД, необходимо сохранять САД-модели промежуточных вариантов двигателя и его элементов (с обоснованием причин

отказа от таких конфигураций), что позволит описать историю доводки ГТД и создаст задел для возможных направлений его дальнейшей модификации.

**ЦД экземпляров.** В этом модуле хранится информация о каждом конкретном экземпляре изделия, которая включает в себя:

- совокупность САД- и САЕ-моделей, используемых для цифрового сопровождения сертификации и эксплуатации, модифицированных для конкретного экземпляра изделия с учетом особенностей его производства, сборки и эксплуатации;
- БД по итогам моделирования, подготовки, проведения, обработки и анализа результатов испытаний конкретного экземпляра изделия;
- БД по эксплуатации конкретного экземпляра;
- историю уточнений и изменений, вносимых в САД- и САЕ-модели, содержащихся в ЦД конкретного экземпляра изделий.

Для каждого отдельного экземпляра изделия в ЦП выделяются отдельные область и совокупность ММ и БД.

**Совокупность взаимосвязанных БД.** Этот модуль включает в себя всю информацию (в «сыром» и обработанном видах), создаваемую и получаемую в ходе ЖЦ ГТД и каждого его экземпляра в отдельности:

- оцифрованную документацию, используемую и создаваемую в ходе ЖЦ изделия;
- оцифрованные отчеты (частично автоматизированные), создаваемые при проектировании, испытаниях и эксплуатации;
- оцифрованное описание методик, создаваемых и используемых на всех этапах ЖЦ изделия;
- информацию о сертификационных испытаниях: перечень, оцифрованные методики подготовки и проведения испытаний, оцифрованную документацию о ходе и результатах испытаний;
- информацию, получаемую в ходе эксплуатации каждого экземпляра изделия (по согласованию с владельцем двигателя и учетом законодательства);
- банк данных по материалам, используемых в изделии и модуль автоматической интеграции характеристик материалов с расчетными моделями;
- различную другую информацию, генерируемую в течение ЖЦ изделия, которую необходимо структурировать и хранить.



Базы данных ЦД изделия тесно связаны с таковыми для ЦД конкретных экземпляров и отраслевыми БД по соответствующим направлениям с высокой степенью автоматизации процессов пополнения и обмена данными между ними. БД внутри ЦД изделия содержат подробную информацию о ЖЦ, а отраслевые БД — обобщенную структурированную информацию.

Каждый модуль ЦД — это не просто совокупность САД/САЕ-моделей, результатов их применения и различных БД, сгруппированных согласно предполагаемым направлениям их использования. Кроме того, модули должны иметь удобный интерфейс и полноценный инструментарий, которые непосредственно в ЦП позволяют:

- удобно и оперативно интегрировать в структуру ЦД модели, создаваемые в различных САД- и САЕ-пакетах, с учетом специфики каждого применяемого программного комплекса;
- настраивать связи между ММ внутри модуля и между модулями, а также между моделями и БД (для изделия, каждого конкретного экземпляра и отраслевых);
- связывать поставленные задачи и сотрудников, чтобы учитывать вклад каждого из участников разработки и эксплуатации изделия и оперативно решать возникающие проблемы путем персонификации ответственности за системы, узлы и ДСЕ.

Так как каждый отдельный модуль отвечает за цифровое сопровождение определенного этапа ЖЦ ГТД, он содержит историю изменения ЦД: эволюцию моделей, применяемых на конкретном этапе, процесс их уточнения и валидации на базе реальных данных, полученных при испытаниях или эксплуатации, постоянно пополняемые базы реальных данных. При этом все изменения, вводимые в ЦД, реализуются в конкретных экземплярах, вследствие чего должны вноситься в ЦД экземпляра с привязкой к реальному времени его создания, испытаний, эксплуатации и т. д.

Таким образом, в ЦП должен иметься специализированный набор интерфейсов и инструментарий, который даст возможность разработчику ГТД отслеживать все вносимые изменения в модели, БД, условия испытаний и эксплуатации, сопоставлять их с различными этапами ЖЦ и реальным временем разработки, испытаний, эксплуатации и доработок каждого конкретного экземпляра изделия.

Методики и ММ, созданные и используемые в ходе проектирования и применяемые на последующих этапах ЖЦ (в том числе модели внутри ЦД конкретных экземпляров), постоянно верифицируются, валидируются и уточняются по результатам испытаний и эксплуатации. Вносимые в методики и ММ правки и уточнения обрабатываются, формализуются и хранятся в соответствующих БД конкретного экземпляра изделия, самого изделия и отраслевых базах данных и знаний.

Взаимодействие с отраслевыми базами данных и знаний обеспечивает высокий уровень преемственности ЦД, снижает стоимость и упрощает процесс последующего создания ЦД других ГТД.

## Выводы

1. Сформулировано определение ЦД ГТД, приведена его функциональная схема и дано подробное описание каждого ее элемента.

2. Структура ЦД двигателя отображает основные этапы его ЖЦ (проектирование, испытания, серийное производство и эксплуатации) и включает в себя:

- многоуровневую систему требований, содержащую структурированную совокупность всех требований, предъявляемых к ГТД, каждой его системе, узлу и ДСЕ на всех этапах ЖЦ;
- модуль проектирования, в состав которого входят формализованная логика проектирования, методики и совокупность САЕ-моделей;
- модуль формирования итоговой конфигурации изделия (САД-модели);
- модуль цифрового сопровождения испытаний, содержащий совокупность методик, САД-моделей, верифицированных и валидированных САЕ-моделей с высоким уровнем соответствия моделируемым испытаниям;
- модуль цифрового сопровождения эксплуатации, включающий в себя совокупность методик, верифицированных и валидированных упрощенных САЕ-моделей, позволяющих оперативно моделировать, анализировать и прогнозировать процесс эксплуатации ГТД;
- ЦД конкретных экземпляров, содержащие БД, САД- и САЕ-модели, которые базируются на конкретном экземпляре ГТД и данных об его испытаниях, производстве и эксплуатации;
- совокупность взаимосвязанных БД, включающая в себя документацию по каждому

этапу ЖЦ ГТД, результаты вычислений, испытаний и эксплуатации, банк материалов и прочую получаемую и документируемую информацию.

3. ЦД базируется на технологической платформе, которая объединяет все его компоненты, организует взаимосвязь между ними, формирует их иерархию, обеспечивает хранение истории изменений и взаимодействие с различными БД (внутренних на предприятии и внешних отраслевых), сторонними ЦП и сервисами, используемыми на всех этапах ЖЦ с учетом их специфики.

4. ЦД могут стать той прорывной технологией, которая объединит в рамках единого цифрового пространства всю совокупность ММ, различных цифровых сервисов и многообразия данных, создаваемых, получаемых и используемых в течение всего ЖЦ ГТД. Это объединение аккумулирует весь накопленный опыт проектирования и доводки двигателей, повысит прозрачность и понимание того, что происходит с ГТД на различных этапах его ЖЦ, повысит характеристики, сократит время разработки и сертификации, а также снизит себестоимость его производства и эксплуатации.

## Литература

- [1] Скибин В.А., Темис Ю.М., Сосунов В.А., ред. *Машиностроение. Энциклопедия. Самолеты и вертолеты*. Т. IV-21. *Авиационные двигатели*. Кн. 3. Москва, Машиностроение, 2010. 720 с.
- [2] Прохоров А., Лысачев М. *Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт*. Москва, АльянсПринт, 2020. 401 с.
- [3] Grieves M. *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication*. LLC, 2014.
- [4] Autiosalo J., Vepsalainen J., Viitala R. et al. A feature-based framework for structuring industrial digital twins. *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 1193–1208, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950507>
- [5] Kritzinger W., Karner M., Traar G. et al. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC-Pap.*, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- [6] Tao F., Cheng J., Qi Q. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 94, no. 9-12, pp. 3563–3576, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- [7] Lee J., Lapira E., Bagheri B. et al. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manuf. Lett.*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 38–41, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>
- [8] Grieves M., Vickers J. Digital Twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Springer, 2017, pp. 85–113.
- [9] Rosen R., Von Wichert G., Lo G. et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-Pap.*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 567–572, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- [10] Boschert S., Rosen R. Digital Twin—the simulation aspect. In: *Mechatronic futures*. Springer, 2016, pp. 59–74.
- [11] Tharma R., Winter R., Eigner M. An approach for the implementation of the digital twin in the automotive wiring harness field. *Proc. DESIGN*, 2018, pp. 3023–3032, doi: <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0188>
- [12] Vatn J. Industry 4.0 and real-time synchronization of operation and maintenance. In: *Safety and reliability — safe societies in a changing world*. CRC Press, 2018, pp. 681–686.
- [13] Liu Z., Chen W., Zhang C. et al. Data super-network fault prediction model and maintenance strategy for mechanical product based on digital twin. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 177284–177296, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957202>
- [14] ГОСТ Р 57700.37–2021. *Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения*. Москва, Российский институт стандартизации, 2021. 10 с.

- [15] Боровков А.И., Рябов Ю.А., Марусева В.М. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения. *Цифровое производство: методы, экосистемы, технологии*. Москва, МШУ Сколково, 2018, с. 24–44.
- [16] *Guide for verification and validation in computational solid mechanics*. ASME, 2007.
- [17] Боровков А.И., Рябов Ю.А., Агеев А.Б. Разработка и применение цифровых двойников в судостроении и кораблестроении. *Сб. тр. XX Межд. науч.-практ. конф. Моринтех-Практик Информационные технологии в судостроении — 2019*. Санкт-Петербург, 2019, с. 9–13.
- [18] Hribernik K., Wuest T., Thoben K.D. Towards Product Avatars Representing Middle-of-Life Information for Improving Design, *Development and Manufacturing Processes*. In *Digital Product and Process Development Systems*, Springer Berlin Heidelberg, 2013. 8596 p. <https://www.semanticscholar.org/paper/Towards-Product-Avatars-Representing-Middle-of-Life-Hribernik-Wuest/a0fb74159ed735ab1b214c68ce3fd7b56bd4c16a>
- [19] Насыров М. Технология ANSYS Twin Builder для модельно-ориентированной разработки и эксплуатации Цифровых двойников. *САПР и Графика*, 2019, № 11, с. 42–45.

## References

- [1] Skibin V.A., Temis Yu.M., Sosunov V.A., eds. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. Samolety i vertolety*. Т. IV-21. *Aviatsionnye dvigateli*. Кн. 3 [Machine building. Encyclopedia. Planes and helicopters. Vol. IV-21. Aviation engines. P. 3.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 720 p. (In Russ.).
- [2] Prokhorov A., Lysachev M. *Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt* [Digital twin. Analysis, trends, world experience]. Moscow, Al'yansPrint, 2020. 401 p. (In Russ.).
- [3] Grieves M. *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication*. LLC, 2014.
- [4] Autiosalo J., Vepsalainen J., Viitala R. et al. A feature-based framework for structuring industrial digital twins. *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 1193–1208, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950507>
- [5] Kritzinger W., Karner M., Traar G. et al. Digital Twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. *IFAC-Pap.*, 2018, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- [6] Tao F., Cheng J., Qi Q. et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, vol. 94, no. 9–12, pp. 3563–3576, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- [7] Lee J., Lapira E., Bagheri B. et al. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manuf. Lett.*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 38–41, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>
- [8] Grieves M., Vickers J. Digital Twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: *Transdisciplinary perspectives on complex systems*. Springer, 2017, pp. 85–113.
- [9] Rosen R., Von Wichert G., Lo G. et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-Pap.*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 567–572, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- [10] Boschert S., Rosen R. Digital Twin—the simulation aspect. In: *Mechatronic futures*. Springer, 2016, pp. 59–74.
- [11] Tharma R., Winter R., Eigner M. An approach for the implementation of the digital twin in the automotive wiring harness field. *Proc. DESIGN*, 2018, pp. 3023–3032, doi: <https://doi.org/10.21278/idc.2018.0188>
- [12] Vatn J. Industry 4.0 and real-time synchronization of operation and maintenance. In: *Safety and reliability — safe societies in a changing world*. CRC Press, 2018, pp. 681–686.

- [13] Liu Z., Chen W., Zhang C. et al. Data super-network fault prediction model and maintenance strategy for mechanical product based on digital twin. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 177284–177296, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957202>
- [14] GOST R 57700.37–2021. *Komp'yuternye modeli i modelirovanie. Tsifrovye dvoyniki izdeliy. Obshchie polozheniya* [State standard GOST R 57700.37–2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions]. Moscow, Rossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2021. 10 p. (In Russ.).
- [15] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Maruseva V.M. [New paradigm of digital design and modeling of global competitive products of new generation]. *Tsifrovoe proizvodstvo: metody, ekosistemy, tekhnologii* [Digital Production: Methods, Ecosystems, Technologies]. Moscow, MShU Skolkovo Publ., 2018, pp. 24–44. (In Russ.).
- [16] *Guide for verification and validation in computational solid mechanics*. ASME, 2007.
- [17] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A., Ageev A.B. [Development and application of digital twins in shipbuilding]. *Sb. tr. XX Mezhd. nauch.-prakt. konf. Morintekh-PRAKTIK Informatsionnye tekhnologii v sudostroenii — 2019* [Proc. XX Int. Sci. Tech. Conf. Morintekh-Praktik Information Technologies in Ship Building – 2019]. Sankt-Petersburg, 2019, pp. 9–13. (In Russ.).
- [18] Hribernik K., Wuest T., Thoben K.D. Towards Product Avatars Representing Middle-of-Life Information for Improving Design, *Development and Manufacturing Processes. In Digital Product and Process Development Systems*, Springer Berlin Heidelberg, 2013. 8596 p. <https://www.semanticscholar.org/paper/Towards-Product-Avatars-Representing-Middle-of-Life-Hribernik-Wuest/a0fb74159ed735ab1b214c68ce3fd7b56bd4c16a>
- [19] Nasyrov M. ANSYS Twin Builder technology for model-oriented development and exploitation of Digital twins. *SAPR i Grafika*, 2019, no. 11, pp.42–45.

Статья поступила в редакцию 28.02.2022

## Информация об авторах

**САЛЬНИКОВ Антон Владелинович** — начальник отдела «Цифровое сопровождение жизненного цикла ГТД». ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 2, e-mail: [avsalnikov@ciam.ru](mailto:avsalnikov@ciam.ru)).

**ГОРДИН Михаил Валерьевич** — кандидат технических наук, ректор. МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: [gordinmv@bmstu.ru](mailto:gordinmv@bmstu.ru)).

**ШМОТИН Юрий Николаевич** — доктор технических наук, заместитель генерального директора — генеральный конструктор. АО «ОДК» (105118, Москва, Российская Федерация, пр-т Буденного, д. 16, e-mail: [info@uecrus.com](mailto:info@uecrus.com)).

**НИКУЛИН Александр Сергеевич** — руководитель направления «Высокопроизводительные вычисления и цифровые двойники изделий». АО «ОДК» (105118, Москва, Российская Федерация, пр-т Буденного, д. 16, e-mail: [a.nikulin@uecrus.com](mailto:a.nikulin@uecrus.com)).

## Information about the authors

**SALNIKOV Anton Vladelinovich** — Head of the Department of Digital Support of the Gas Turbine Engine Life Cycle. Central Institute of Aviation Motors (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bld. 2, e-mail: [avsalnikov@ciam.ru](mailto:avsalnikov@ciam.ru)).

**GORDIN Mikhail Valeryevich** — Candidate of Science (Eng.), Rector. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [gordinmv@bmstu.ru](mailto:gordinmv@bmstu.ru)).

**SHMOTIN Yury Nikolaevich** — Doctor of Science (Eng.), Deputy General Director — General Designer. United Engine Corporation — ODK (105118, Moscow, Russian Federation, Budennogo Av., Bldg.11, e-mail: [info@uecrus.com](mailto:info@uecrus.com)).

**NIKULIN Aleksandr Sergeevich** — Head of Research Sector of High-Performance Computing and Digital Twins. United Engine Corporation — ODK (105118, Moscow, Russian Federation, Budennogo Av., Bldg.11, e-mail: [a.nikulin@uecrus.com](mailto:a.nikulin@uecrus.com)).

**МАКАРОВ Павел Вячеславович** — кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора производственного комплекса «Салют». АО «ОДК» (105118, Москва, Российская Федерация, пр-т Буденного, д. 16, e-mail: makarov-pv@uecrus.com).

**MAKAROV Pavel Vyacheslavovich** — Candidate of Science (Eng.), Deputy General Designer. Salyut production complex. United Engine Corporation (105118, Moscow, Russian Federation, Budennogo Av., Bldg.16, e-mail: makarov-pv@uecrus.com).

**ФРАНЦУЗОВ Максим Сергеевич** — заместитель начальника отдела «Цифровое сопровождение жизненного цикла ГТД». ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» (111116, Москва, Российская Федерация, ул. Авиамоторная, д. 2, e-mail: msfrantsuzov@ciam.ru).

**FRANTSUZOV Maksim Sergeevich** — Deputy Head of the Department of Digital Support of the Gas Turbine Engine Life Cycle. Central Institute of Aviation Motors (111116, Moscow, Russian Federation, Aviamotornaya St., Bld. 2, e-mail: msfrantsuzov@ciam.ru).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Сальников А.В., Гордин М.В., Шмотин Ю.Н., Никулин А.С., Макаров П.В., Французов М.С. Цифровые двойники — платформа для управления жизненным циклом авиационных двигателей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 4, с. 60–72, doi: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72

**Please cite this article in English as:**

Salnikov A.V., Gordin M.V., Shmotin Yu.N., Nikulin A.S., Makarov P.V., Frantsuzov M.S. Digital Twins — a Platform for Aircraft Engine Lifecycle Management. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 4, pp. 60–72, doi: 10.18698/0536-1044-2022-4-60-72



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям монографию**

**«Строительная механика композитных  
конструкций ракетно-космической техники.  
Курс лекций»**

**Авторы: Ан.А. Смердов, Ал.А. Смердов**

Приведены основные положения теории оптимального проектирования конструкций, рассмотрены методы проектных расчетов композитных материалов и простейших элементов конструкций, а также несущих композитных оболочек различных конструктивных схем и размеростабильных композитных космических конструкций. Представлены алгоритмы расчета типовых композитных элементов конструкций, которые могут быть самостоятельно использованы студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракетно-космических комплексов» Материал отдельных лекций может быть также использован при изучении смежных дисциплин, таких как «Проектные расчеты композитных конструкций ракетно-космической техники», «Строительная механика ракет» и «Строительная механика космических аппаратов».

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>