**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО**

**ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ**  **РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ** | **ПНСТ**  **(проект)** |

**Компьютерные модели и моделирование**

**ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**Общие положения**

**(проект)**

**Настоящий проект стандарта не подлежит применению до его утверждения**

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Государственным научным центром, федеральным автономным учреждением «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 700 «Математическое моделирование и высокопроизводительные вычислительные технологии»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от \_\_\_\_\_\_\_\_\_ г. № \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. №162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*[*www.rst.gov.ru*](http://www.rst.gov.ru)*).*

© Оформление, ФГБУ «РТС», 2022

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

[**1 Область применения** 1](#_Toc151341114)

[**2 Нормативные ссылки** 1](#_Toc151341115)

[**3 Термины и определения** 3](#_Toc151341116)

[**4 Сокращения** 5](#_Toc151341117)

[**5 Общие положения** 6](#_Toc151341118)

[**6 Общая классификация цифровых двойников газотурбинных двигателей** 8](#_Toc151341136)

[**7 Рекомендуемый состав цифровых двойников газотурбинных двигателей** 9](#_Toc151341146)

[**8 Рекомендуемый состав моделируемых физических процессов для цифровых двойников газотурбинных двигателей** 11](#_Toc151341166)

[**7 Цели и задачи применения цифровых двойников газотурбинных двигателей**  14](#_Toc151341208)

[**9 Общий порядок разработки и применения цифрового двойника газотурбинного двигателя** 18](#_Toc151341252)

[**10 Участники процесса разработки цифрового двойника газотурбинного двигателя** 19](#_Toc151341274)

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Компьютерные модели и моделирование**

**ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

**Общие положения**

Computer models and simulation.

Digital twins of aviation gas turbine engines. General provisions

**Срок действия —**

1. **Область применения**

Настоящий стандарт устанавливает общие положения к цифровым двойникам авиационных газотурбинных двигателей.

Порядок создания авиационного газотурбинного двигателя по ГОСТ Р 58849-2020.

В случае возникновения противоречий между настоящим стандартом и нормативными правовыми актами Российской Федерации, применению подлежат последние.

1. **Нормативные ссылки**

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 57188–2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения

ГОСТ Р 57700.1–2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Требования

ГОСТ Р 57700.2–2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения

ГОСТ Р 57412-2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения

ГОСТ Р 57700.22-2020 Компьютерные модели и моделирование. Классификация

ГОСТ Р 57700.23—2020 Компьютерные модели и моделирование. Валидация. Общие положения

ГОСТ Р 57700.24—2020 Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис

ГОСТ Р 57700.25—2020 Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации

ГОСТ Р 57700.37—2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения

ГОСТ 16504—81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Термины и определения

ГОСТ Р 59853—2021 Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения

ГОСТ Р 53392—2017 Интегрированная логистическая поддержка. Анализ логистической поддержки. Основные положения

ГОСТ Р 58849—2020 Авиационная техника гражданского назначения. Порядок создания. Основные положения

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования     – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

1. **Термины и определения**

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

|  |
| --- |
| **адекватность модели:** соответствие модели моделируемому изделию (процессу, явлению) по обоснованному перечню характеристик.  [ГОСТ Р 57700.37, статья 3.1] |

* 1. **банк данных по материалам цифровых двойников газотурбинных двигателей:** база данных, содержащая в себе всю необходимую информацию о материалах для проведения расчетных работ.

|  |
| --- |
| **валидация модели изделия:** подтверждение адекватности модели моделируемому изделию.  [ГОСТ Р 57700.37, статья 3.2] |

|  |
| --- |
| **головной разработчик:** юридическое лицо, являющееся разработчиком авиационной техники, координирующее работу разработчиков составных частей авиационной техники и отвечающее за разработку авиационной техники в целом.  [ГОСТ Р 58849-2020, статья 3.1.13] |



|  |
| --- |
| **компьютерная модель:** модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными.  [ГОСТ Р 57412, статья ] |

|  |
| --- |
| **~~многоуровневая система требований:~~** ~~Иерархическая система взаимосвязанных структур данных, содержащих формализованные требования к изделию и его составным частям~~  ~~[ГОСТ Р 57700.37, статья 3.16]~~ |

|  |
| --- |
| **натурные испытания:** испытания объекта в условиях, соответствующих условиям его использования по прямому назначению с непосредственным оцениванием или контролем определяемых характеристик свойств объекта.  [ГОСТ 16504-81, статья 56] |

|  |
| --- |
| **объект моделирования:** явление, объект или свойство объекта реального мира.  [ГОСТ Р 57412, статья 3.1.2] |

* 1. **основное изделие:** образец авиационной техники, морское судно, наземная электростанция или газоперекачивающая станция, в состав которого (которой) входит разрабатываемый или поставляемый газотурбинный двигатель.

|  |
| --- |
| **цифровой двойник изделия:** система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями.  Примечания  1. Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия.  2. При создании и применении цифрового двойника изделия участникам процессов жизненного цикла рекомендуется применять программно-технологическую платформу цифровых двойников.  [ГОСТ Р 57700.37, статья 3.24] |

|  |
| --- |
| **цифровые (виртуальные) испытания:** определение количественных и (или) качественных характеристик свойств объекта испытаний как результата исследования свойств цифровой модели (или цифрового двойника) этого объекта.  [ГОСТ Р 57700.37, статья 3.27] |

|  |
| --- |
| **цифровая модель изделия:** Система математических и компьютерных моделей, а также электронных документов изделия, описывающая структуру, функциональность и поведение вновь разрабатываемого или эксплуатируемого изделия на различных стадиях жизненного цикла, для которой на основании результатов цифровых и (или) иных испытаний по ГОСТ 16504 выполнена оценка соответствия предъявляемым к изделию требованиям.  [ГОСТ Р 57700.37, статья 3.23] |

* 1. **составная часть цифрового двойника газотурбинного двигателя; СЧ ЦД ГТД:** совокупность цифровых моделей, данных и двухсторонних связей с составными частями газотурбинного двигателя (при их наличии), структурированная и объединенная согласно СЧ ГТД или стадии жизненного цикла.

1. **Сокращения**

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

АТ – авиационная техника;

АГТД – авиационный газотурбинный двигатель;

ЖЦ – жизненный цикл;

ИКАО – международная организация гражданской авиации;

КМ – компьютерная модель;

НИО – научно-исследовательская организация;

НИР – научно-исследовательская работа;

ОКР – опытно-конструкторские работы;

ОМ - объект моделирования;

ОО – опытный образец;

РКД – рабочая конструкторская документация;

СЧ – составная часть;

ТЗ – техническое задание;

ТОиР – техническое обслуживание и ремонт;

ТТЗ – тактико-техническое задание;

ЦД – цифровой двойник;

ЦД-Р – цифровой двойник, наполнение и функциональность которого определяется в ходе реализации стадии разработки изделия;

ЦД-П – цифровой двойник, наполнение и функциональность которого определяется в ходе реализации стадии производства изделия;

ЦД-Э – цифровой двойник, наполнение и функциональность которого определяется в ходе реализации стадии эксплуатации изделия;

ЭЦИ – эквивалентно-циклические испытания.

1. **Общие положения**

5.1 ЦД ГТД разрабатывается на любой стадии жизненного цикла ГТД за исключением стадии «Исследования в обеспечение создания опережающего научно-технического задела для образца авиационного двигателя» по ГОСТ Р 58849‑2020.

5.2 Требования к ЦД ГТД устанавливает заказчик разработки ЦД ГТД в техническом задании на разработку или модернизацию (модификацию) ЦД ГТД (далее по тексту - ТЗ).

Примечание - В зависимости от стадии жизненного цикла ГТД, на которой осуществляется разработка ЦД ГТД, основанием для разработки ЦД ГТД может быть ТТЗ (ТЗ) на разработку/модернизацию ГТД, а также контракт или ТЗ на разработку ЦД ГТД в инициативном порядке.

5.3 Если в процессе жизненного цикла ГТД выявлена необходимость уточнения (дополнения) отдельных требований к ЦД ГТД - заказчик разработки ЦД ГТД выпускает дополнение к ТЗ. По решению заказчика разработки ЦД ГТД уточнение (дополнение) требований к КМ допускается оформлять в виде совместного решения в произвольной форме.

5.4 Отдельные КМ узлов и систем в соответствии с функциональной схемой проектирования ГТД (компрессор, турбина, камера сгорания и т.д.) являются СЧ ЦД ГТД и не могут быть признаны ЦД ГТД в целом.

5.5 ЦД ГТД должен быть верифицирован на предмет:

- всех цифровых моделей, требования к которым предъявлены в ТЗ на разработку ЦД ГТД;

- двусторонних информационных связей цифровых моделей с ГТД (при его наличии) требования, к которым предъявлены в ТЗ на разработку ЦД ГТД.

5.5.1 КМ, включаемые в состав ЦД ГТД должны быть валидированы в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.23 и ГОСТ Р 57700.25.

5.5.2 Валидационный базис должен быть разработан в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.24.

5.5.3 Валидация ЦД ГТД осуществляется в соответствии с правилами заказчика разработки ЦД ГТД.

5.6 Внесение изменений в ЦД ГТД осуществляется в соответствии с правилами, разработчика ЦД ГТД, по согласованию с заказчиком разработки ЦД ГТД, с учетом правил по изменению отдельных видов цифровых моделей, включенных в состав ЦД ГТД.

5.7 ЦД ГТД должен функционировать в системе управления данными об изделии, которая будет обеспечивать в процессе жизненного цикла ГТД наполнение его ЦД актуальными данными (расчётные, экспериментальные, эксплуатационные и т.д.).

5.8 Для применения ЦД ГТД по назначению на стадии испытаний и сертификации должна быть создана система сбора, хранения и обработки экспериментальных данных.

5.9 Для применения ЦД ГТД по назначению на стадии эксплуатации должна быть создана система мониторинга технического состояния ГТД и обеспечен своевременный обмен информацией с системой управления данными об изделии, в рамках которой функционирует ЦД ГТД, в интересах дальнейшей модернизации ГТД и накопления валидационного базиса по результатам эксплуатации.

5.9.1 В контракт (договор) поставки ГТД и (или) основного изделия должны быть включены обязательства по предоставлению эксплуатирующей организацией согласованного перечня предоставляемых данных, частоты их обновления и способов предоставления/получения.

1. **Общая классификация цифровых двойников газотурбинных двигателей**

6.1 В дополнении ГОСТ Р 57700.37, с учётом требований ГОСТ Р 58849-2020, ЦД ГТД по назначению подразделяют:

− ЦД ГТД разработчика ГТД (вариант ЦД-Р по ГОСТ Р 57700.37) – ЦД ГТД, используемый (используемые) головным разработчиком ГТД и разработчиками СЧ ГТД для решения конструкторских задач в ходе создания ГТД, расчетного и экспериментального подтверждения его соответствия ТЗ (ТТЗ), а также сопровождения ГТД в процессе его ЖЦ.

− ЦД ГТД головного разработчика основного изделия (вариант ЦД-Э по ГОСТ Р 57700.37) - как СЧ ЦД основного изделия, применяемая головным разработчиком соответствующего основного изделия.

− ЦД ГТД эксплуатирующей организаци, служб ТОиР (вариант ЦД-Э по ГОСТ Р 57700.37) – ЦД экземпляров ГТД в составе изделий авиационной техники, используемые для выполнения задач эксплуатации, ТОиР.

6.2 Учитывая требования предъявляемые ГОСТ Р 58849‑2020 к ГТД на стадиях его ЖЦ, ЦД ГТД разработчика ГТД может подразделяться:

− ЦД ГТД разработчика ГТД на этапе прикладного НИР. Содержит в себе цифровые модели, данные и двусторонние связи демонстрационного двигателя прототипа, его систем, узлов и деталей, которые создаются при проведении совокупности теоретических и экспериментальных работ по обоснованию путей создания перспективных АД и их составных частей, в том числе оценку достижимых уровней параметров, характеристик и других показателей качества АД с учетом использования новых технических и конструктивных решений систем и узлов.

− ЦД ГТД разработчика ГТД на этапе ОКР. Содержит в себе цифровые модели, данные и двусторонние связи опытного образца и серийного двигателя, его систем, узлов и деталей.

− ЦД ГТД разработчика модификации ГТД. Содержит в себе цифровые модели, данные и двусторонние связи новой модификации опытного образца и серийного двигателя, его систем, узлов и деталей.

6.3 Необходимость включения в ЦД ГТД цифровых моделей и экспериментальных данных, полученных на этапе НИР, оговаривается в ТЗ на разработку ЦД ГТД.

1. **Рекомендуемый состав цифровых двойников газотурбинных двигателей**

7.1 Составные части ЦД ГТД наполняются постепенно в ходе жизненного цикла ГТД согласно ГОСТ Р 58849-2020 и ГОСТ Р 57700.37-2021.

7.2 Каждый вариант ЦД ГТД разработчика ГТД может иметь следующие составные части:

~~− многоуровневая система требований;~~

− банк данных по материалам ЦД ГТД;

Примечание

Рекомендуется создать ~~многоуровневую систему требований ЦД ГТД и~~ банк данных по материалам ЦД ГТД на стадии «Прикладные научно-исследовательские работы в обеспечение создания образцов авиационных двигателей, их систем и составных частей» по ГОСТ Р 58849-2020 и дополнять и корректировать их на всех последующих этапах жизненного цикла.

− модуль сопровождения проектирования – СЧ ЦД ГТД, которая включает в себя совокупность 1D÷3D цифровых моделей, структурированных с учетом применяемых подходов и методов проектирования, применяемых разработчиком ГТД. В состав модуля проектирования ГТД входят структурированные и формализованные методики, по которым осуществляется проектирование двигателя, его узлов, систем и деталей, совокупность КМ разного уровня сложности, создаваемых в ходе проектирования, их эволюция и история проектирования (в том числе «тупиковые» ветви разработки). Данный модуль ЦД ГТД используется Головным разработчиком ГТД и разработчиками СЧ для решения конструкторских задач в ходе создания ГТД и расчетного подтверждения его соответствия ТЗ (ТТЗ).

− модуль сопровождения испытаний – СЧ ЦД ГТД, которая включает в себя совокупность КМ и цифровых испытаний деталей, элементов, узлов и систем, а также самого ГТД, структурированных согласно требованиям к порядку проведения экспериментальных работ и сертификационных испытаний. Данная СЧ ЦД ГТД используется специалистами испытательных центров и лабораторий для расчетного подтверждения соответствия предъявляемого образца ГТД требованиям ТЗ (ТТЗ). Рекомендуется КМ, используемые для моделирования испытаний, разрабатывать на базе КМ соответствующих деталей и узлов, созданных по итогам проектирования в модуле сопровождения проектирования. Рекомендуется в этом модуле хранить методики разработки, верификации и валидации КМ, результаты испытаний, историю их подготовки и проведения, методики обоснования перед сертифицирующими организациями способов снижения объемов испытаний.

− модуль конфигурации изделия - СЦ ЦД ГТД, в которая включает в себя КД и КДД ГТД и его опытных экземпляров.

− модуль сопровождения эксплуатации – СЦ ЦД ГТД, которая включает в себя компьютерные модели и результаты их применения, разработанные в интересах эксплуатанта ЦД ГТД при сопровождении эксплуатации ГТД (эксплуатация по техническому состоянию, прогнозирование технического состояния и т.д.). Также в данном модуле собираются и обрабатываются данные, получаемые и передаваемые в процессе эксплуатации, которые используются разработчиком ЦД ГТД для создания КМ для ЦД экземпляров, а также их валидации.

Примечание - На этапе прикладного НИР данный модуль содержит компьютерные модели, с помощью которых на базе демонстрационного двигателя прототипа отрабатывается идеология бортовой и наземной систем диагностики и прогнозирования состояния двигателя и системы автоматического управления. Информация, полученная на этой стадии ЖЦ и сохраненная в ЦД ГТД разработчика ГТД, будет использоваться для разработки аналогичных систем на этапах ОКР и эксплуатации.

7.3 Состав ЦД ГТД головного разработчика основного изделия и требования к КМ определяются головным разработчиком основного изделия. ЦД ГТД головного разработчика основного изделия появляется после окончания этапа ОКР. По итогам испытаний и сертификации ГТД проводится уточнение КМ, используемых в данном ЦД ГТД. Уточнения и дополнения могут вносится по итогам модернизации и модификации ГТД.

7.4 Состав ЦД ГТД эксплуатирующей организаци и служб ТОиР, требования к КМ, входящим в его состав, определяются порядком осуществления эксплуатации ГТД, а также разработчиком и эксплуатантом ЦД ГТД.

7.5 Структура и базовый состав требований и КМ для данного вида ЦД ГТД разрабатывается на этапе ОКР. Уточняется и дополняется по итогам испытаний и сертификаций, а также в ходе серийного производства изделия. Рекомендуется для каждого экземпляра ГТД делать свой ЦД экземпляра, в котором осуществлять сбор, хранение и обработку данных по эксплуатации этого двигателя. Рекомендуется в состав ЦД экземпляра ГТД включать следующие СЧ:

− Модуль сбора, обработки и хранения данных о подготовке, проведения, обработки и анализа результатов испытаний конкретного экземпляра изделия.

− Модуль сбора, обработки и хранения данных об эксплуатации конкретного экземпляра изделия.

− Модуль, содержащий КМ ГТД, его систем, узлов и деталей, моделирующих процесс эксплуатации изделия и используемых для определения и прогнозирования технического состояния изделия.

− Модуль для хранения истории уточнений и изменений, вносимых в конкретный экземпляр ГТД и его ЦД

1. **Рекомендуемый состав моделируемых физических процессов для цифровых двойников газотурбинных двигателей**

8.1 В состав модуля сопровождения проектирования ЦД ГТД могут входить:

− Термогазодинамическое моделирование двигателя

− Расчеты на статическую и динамическую прочность двигателя

− Моделирование тепло-гидравлического состояния ГТД, его узлов и деталей в течение ТПЦ

− Расчеты системы электрооборудования

− Моделирование работы системы автоматического управления

− Моделирование работы топливной системы

− Газодинамическое моделирование компрессора, камеры сгорания и турбины для оценки их соответствия заявленным параметрам

− Компьютерное моделирование для оценки характеристик статической и динамической прочности, а также циклической долговечности деталей и узлов ГТД

− Компьютерное моделирование с целью оценки критических частот вращения роторов

− Компьютерное моделирование теплового состояния элементов конструкции наружного контура

− Расчеты на статическую и динамическую прочность сборочных единиц наружного контура

− Оценка акустических характеристик двигателя и его элементов

− Термомеханическое моделирование двигателя и его узлов с целью определения кинетики радиальных и осевых зазоров в течение ТПЦ

− Гидравлические расчеты системы охлаждения турбины

− Компьютерное моделирование нарастания льда в условиях классического обледенения

− Компьютерное моделирование стойкости лопаток вентилятора и КНД к попаданию посторонних предметов

− Компьютерное моделирование непробиваемости корпуса при обрыве лопатки

− Компьютерное моделирование с целью определение газодинамических характеристик мотогондолы

8.2 В состав модуля сопровождения испытаний ЦД ГТД могут входить:

− Перечень моделируемых физических процессов, приведенных в пункте 8.1, но с учетом стендового оборудования, на котором проводится испытания, и программы испытаний.

− Термомеханическая модель газогенератора в составе испытательного стенда, прогнозирующая кинетику его теплового состояния и зазоров в процессе испытаний.

− Тепловое и прочностное моделирование ресурсных стендовых испытаний с имитацией полетных условий для определения оптимальной программы ЭЦИ.

− Термогазодинамическое моделирование состояния двигателя в ходе заводских летных испытаний (для стадии ОКР)

Примечание

Для натурных и сертификационных испытаний может применяться разное стендовое оборудование. Программа их проведения, а также методики сбора и обработки результатов также может отличаться. Поэтому рекомендуется выделить в модуле сопровождения испытаний отдельные СЧ ЦД ГТД для разных типов испытаний двигателя, его систем, узлов и деталей.

8.3 В состав модуля сопровождения эксплуатации ЦД ГТД могут входить:

− Комплексные 2D–3D КМ для моделирования реальных или возможных случаев эксплуатации, применяемые для исследования расчетными способами возможных причин отказов или поломки ГТД (или его системы, узла, ДСЕ) в ходе эксплуатации,

− Комплексные 2D–3D КМ, применяемые для формирования множества расчетных эксплуатационных случаев, на базе которых в совокупности с большим объемом данных из реальной эксплуатации будет проводиться уточнение и отладка 1D КМ;

− упрощенные 1D КМ для онлайн мониторинга и прогнозирования технического состояния ГТД, его систем, узлов и ДСЕ.

8.4 В состав ЦД ГТД ~~головного~~ разработчика ГТД по окончании ОКР могут входить:

− CAD всего двигателя

− Термогазодинамическая модель двигателя

− КМ системы управления

8.5 В состав ЦД экземпляров ГТД по окончании ОКР и в процессе эксплуатации могут входить:

− CAD модель экземпляра двигателя с учетом особенностей его изготовления и сборки

− модели для оценки выработки ресурса

− модели для контроля технического состояния;

− модели для диагностирования неисправностей;

− модели для прогнозирования технического состояния;

− модели для трендового анализа.

− КМ системы управления и термодинамическая модель данного экземпляра двигателя, уточняемая по результатам испытаний и эксплуатации этого экземпляра

8.6 При переходе между стадиями разработки ГТД разработчику его ЦД рекомендуется фиксировать текущее состояние ЦД в проектной документации, проводит анализ применимости ранее разработанных КМ на следующем этапе, определяет необходимость доработки имеющихся КМ или разработки новых в соответствии с ТЗ на ЦД ГТД.

8.7 Требуемый перечень компьютерных моделей (и требования к ним), которые должны входить в ЦД ГТД, его варианты и СЧ на разных этапах жизненного цикла ГТД приводятся в ТЗ на разработку ЦД ГТД.

1. **Цели и задачи применения цифровых двойников газотурбинных двигателей**

9.1 ЦД ГТД предназначен для контроля выполнения требований, предъявляемых к изделию в рамках соответствующей стадии жизненного цикла ГТД.

9.2 В ходе выполнения прикладных научно-исследовательских работ в обеспечение создания образца ГТД его ЦД может применяться для:

− проведения сравнительного анализа параметров (характеристик) различных вариантов конструкции ГТД (носят оценочный характер);

− обоснования принятия решения по выбору конструкции и функциональности ГТД для обоснования проведения ОКР;

− формирования проекта ТЗ (ТТЗ) на ОКР с учетом расчетного подтверждения достижимости заявленных характеристик.

9.3 В ходе выполнения ОКР по созданию образца ГТД, на этапах эскизного и технического проектов ЦД ГТД может применяться для:

− проведения исследования основных эксплуатационно-технических параметров (характеристик) ГТД;

− проведения сравнительного анализа параметров (характеристик) различных вариантов конструкции ГТД, в интересах проверки соответствия нормам лётной годности, нормам прочности, требованиям ИКАО к экологическим характеристикам с учётом ожидаемого их ужесточения;

− оптимизации проекта программы сертификационных работ (Федеральные авиационные правила) с учетом применения цифровых испытаний в качестве метода определения соответствия;

− подтверждения соответствия изделия требованиям ТЗ (ТТЗ) при предъявлении его электронного макета макетной комиссии (где применимо).

9.4 На стадии ОКР, по окончании разработки РКД, ЦД ГТД может применяться для подтверждения готовности конструкции к началу изготовления опытного образца.

9.5 На стадии ОКР, при изготовлении опытного образца ГТД его ЦД может применяться для подтверждения его готовности к началу испытаний с учетом допущенных отклонений от РКД.

9.6 На стадии ОКР, в ходе испытаний ЦД ГТД может применяться для:

− проведение цифровых испытаний совместно или вместо натурных испытаний (где применимо) при доводке опытного образца ГТД с целью сокращения сроков и снижения стоимости доводочных работ;

− расчетное подтверждение готовности опытного образца ГТД к заводским летным испытаниям государственным (сертификационным) испытаниям, а также, проведение цифровых испытаний совместно или вместо натурных испытаний (где применимо);

− проведение цифровых испытаний совместно или вместо натурных испытаний (где применимо) при проведении сертификационных испытаний опытного образца ГТД на предмет соответствия требованиям ТЗ, нормам летной годности и требованиям ИКАО.

9.7 На стадии серийного производства ЦД ГТД может применяться для:

− оценки влияния производственных отклонений на тактико-технические характеристики экземпляра ГТД;

− оценки и учёта влияния технологии изготовления на конструкцию экземпляра ГТД;

− проведения цифровых испытаний в интересах разработки рекомендаций по настройке, регулировке и сервисному обслуживанию данного экземпляра ГТД.

9.8 На стадии эксплуатации, модернизации и модификации ЦД ГТД может применять для:

− моделирования технического состояния ГТД в условиях эксплуатации, приближенных к реальным;

− анализа полученного опыта технической эксплуатации образца и его отдельных экземпляров с целью оценки безопасности и отказоустойчивости ГТД и его СЧ, корректировки процедур ТОиР, планирования ТОиР, подготовки предложений по внесению изменений в конструкцию образца, выполнение иных мероприятий, предусмотренных процедурами анализа логистической поддержки в соответствии с требованиями ГОСТ 53392;

− прогнозирования показателей надёжности ГТД с сохранение характеристик экземпляра на заданном уровне или их изменения с заданным уровнем деградации, с учетом накопленного опыта эксплуатации;

− анализа поступивших рекламаций и выявления возможных причин, приведших к отказам и дефектам в ЦД ГТД.

1. **Требования к цифровому двойнику авиационного газотурбинного двигателя**

При планировании разработки ЦД ГТД, к нему должны быть установлены следующие требования к:

− назначению ЦД ГТД, с учетом требований раздела 5 и 6;

− комплекту поставки ЦД ГТД;

- управлением конфигурацией ЦД,

- информационным связям с ГТД;

- работе в реальном времени;

− составу и значениям параметров (характеристик) ГТД и связанных и/или воздействующих на него физических процессов, подлежащих исследованиям при компьютерном моделированиии;

~~− многоуровневая система требований;~~

− банку данных по материалам ЦД ГТД;

− наличию и структуре модуля сопровождения проектирования, модуля сопровождения испытаний, модуля сопровождения эксплуатации;

− функциональным возможностям применяемого ПО КМ (по моделируемым физическим процессам и методам решений математических уравнений, в соответствии с классификацией компьютерных моделей в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.22, ГОСТ Р 57188);

− по использованию верификацированного ПО КМ в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57700.1 и ГОСТ Р 57700.2;

- сохранению экземпляра ПО КМ для обеспечения работоспособности КМ включенных в ЦД ГТД

− интероперабельности ЦД ГТД и КМ в его составе (способности взаимодействовать (функционировать) с другими ЦД, КМ и/или ПО КМ);

− используемым методикам компьютерного моделирования;

− включению результатов моделирования в состав ВБ (требования к ВБ - в соответствии с требованимя ГОСТ Р 57700.25);

− необходимости выполнения валидации КМ входящих в составЦД ГТД;

− характеристикам вычислительной техники (производительность, объем оперативной памяти, емкость дискового пространства и т.п.) и сетевой инфраструктуры, необходимой ЦД ГТД для выполнения поставленных целей и задач;

− форме и формату представления результатов моделирования.

1. **Участники процесса разработки цифрового двойника газотурбинного двигателя**

11.1 В общем случае участниками процесса разработки и применения ЦД ГТД являются:

− заказчик разработки ЦД ГТД;

− разработчик ЦД ГТД;

− пользователь ЦД ГТД.

11.2 В качестве заказчика ЦД ГТД может выступать государственный заказчик, головной разработчик основного изделия, разработчик ГТД.

11.3 Заказчик разработки ЦД ГТД:

− устанавливает в ТЗ требования к ЦД ГТД;

− утверждает ТЗ;

− устанавливает правила валидации ЦД ГТД и КМ входящих в его состав;

− согласовывает изменения ЦД ГТД;

− принимает ЦД ГТД в эксплуатацию.

11.4 В качестве разработчика ЦД ГТД может выступать – головной разработчик основного изделия, разработчик ГТД, другие организации имеющие подтверждённый опыт в области цифрового проектирования ГТД.

11.5 Разработчик ЦД ГТД:

− разрабатывает ЦД ГТД;

− осуществляет валидацию ЦД ГТД и КМ входящих в его состав;

− осуществляет поставку ЦД ГТД пользователю ЦД ГТД в соответсвии с условиями контракта;

− вносит изменения в состав ЦД ГТД по результатам проведённых испытаний ГТД, цифровых или натурных, или применения по назначению;

− актуализирует валидационный базис ЦД ГТД по результатам натурных испытаний и/или результатов эксплуатации ГТД (при необходимости).

11.6 Эксплуатант ЦД ГТД:

− применяет ЦД ГТД в процессе эксплуатации ГТД;

− предоставляет разработчику ЦД ГТД и/или самостоятельно выполняет актуализацию валидационного базиса ЦД ГТД по результатам натурных испытаний и/или результатов эксплуатации ГТД (при необходимости);

− обеспечивает разработчика ЦД ГТД результатами мониторинга технической эксплуатации изделия (если применимо).

|  |
| --- |
| УДК 006.354:004.942 ОКС 01.140.01  Ключевые слова: цифровой двойник, авиационный газотурбинный двигатель, компьютерная модель, цифровые испытания |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Руководитель организации – разработчика  ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»  Генеральный директор | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | А.Л. Козлов |
| Руководитель разработки  Заместитель генерального  директора по науке | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | А.В. Луковников |
| Исполнитель  Начальник отдела | \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ | А.В. Сальников |