
**Космические системы.
Определение уровней и критериев
оценки технологической готовности
(TRL) космических систем и их
элементов**

*Space systems — Definition of the Technology Readiness Levels
(TRLs) and their criteria of assessment*

Ответственность за подготовку русской версии несёт GOST R
(Российская Федерация) в соответствии со статьёй 18.1 Устава ISO





ДОКУМЕНТ ЗАЩИЩЕН АВТОРСКИМ ПРАВОМ

© ISO 2013

Все права сохраняются. Если не указано иное, никакую часть настоящей публикации нельзя копировать или использовать в какой-либо форме или каким-либо электронным или механическим способом, включая фотокопии и микрофильмы, без предварительного письменного согласия ISO по адресу ниже или членом ISO в стране регистрации пребывания.

ISO copyright office
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20
Tel. + 41 22 749 01 11
Fax + 41 22 749 09 47
E-mail copyright@iso.org
Web www.iso.org

Опубликовано в Швейцарии

Содержание

Страница

Предисловие	iv
Введение	v
1 Область применения	1
2 Термины и определения	1
3 Уровни технологической готовности.....	5
3.1 Основные положения.....	5
3.2 TRL 1. Получение и задание основных принципов	6
3.3 TRL 2. Формулирование концепции технологии и/или использования	6
3.4 TRL 3. Аналитическая и экспериментальная критическая функция и/или концепция с характеристиками	7
3.5 TRL 4. Оценка функциональности компонента и/или модели в лабораторных условиях.....	7
3.6 TRL 5. Оценка критической функции компонента и/или модели в релевантной среде.....	8
3.7 TRL 6. Критические функции испытания модели в релевантной среде	9
3.8 TRL 7. Демонстрационная модель в условиях эксплуатации	10
3.9 TRL 8. Конечная система разработана и прошла летную квалификацию испытаниями и демонстрацией.....	11
3.10 TRL 9. Конечная система, прошедшая летную квалификацию удачными испытаниями.....	11
4 Сводная таблица	11
Библиография	14

Предисловие

Международная организация по стандартизации (ISO) является всемирной федерацией национальных организаций по стандартизации (комитетов-членов ISO). Разработка международных стандартов обычно осуществляется техническими комитетами ISO. Каждый комитет-член, заинтересованный в деятельности, для которой был создан технический комитет, имеет право быть представленным в этом комитете. Международные правительственные и неправительственные организации, имеющие связи с ISO, также принимают участие в работах. ISO работает в тесном сотрудничестве с Международной электротехнической комиссией (IEC) по всем вопросам стандартизации в области электротехники.

Процедуры разработки документа и дальнейшего ведения его установлены в Директивах ISO/IEC, Часть 1. В частности, следует отметить необходимость других критериев одобрения для различных типов документов ISO. Данный документ разработан в соответствии с правилами, установленными в Директивах ISO/IEC, Часть 2. www.iso.org/directives.

Следует иметь в виду, что некоторые элементы данного документа могут быть объектом патентных прав. Организация ISO не должна нести ответственность за идентификацию какого-либо одного или всех патентных прав. Детали объекта патентных прав размещаются в разделе Введение и/или на сайте ISO в разделе Патентных прав. www.iso.org/patents

Любое торговое имя используемое в этом документе является информацией предоставляемой для удобства пользователей и не является передаточной надписью.

Данный документ разработан Техническим комитетом ISO/TC 20 *Авиационные и космические аппараты*, Подкомитетом SC 14, *Космические системы и их эксплуатация*.

Введение

Уровни технологической готовности (TRL) используются для определения статуса отработанности космических технологий. Отработанные технологии соответствуют высшему уровню технологической готовности (TRL 9) или допуску к летным испытаниям космической системы или ее элемента.

Шкала оценки TRL может применяться во многих областях, включая:

- a) контроль готовности технологий, специфичных для данной конкретной космической программы или будущих программ на ранних этапах их подготовки
- b) оценку уровня завершенности проекта по созданию космической системы для принятия решения по его реализации
- c) мониторинг развития космических технологий.

В Разделе 3 данного стандарта описаны определения уровней TRL. В Разделе 4 данного стандарта имеется сводная результирующая таблица, дающая возможность оценить уровни TRL. Детальные процедуры оценки уровней TRL устанавливаются соответствующими организациями или институтами в рамках их совместной деятельности.

Стандарт разработан с учетом существующих документов по данной тематике, в частности, документы National Aeronautics Space Administration (NASA), the US Department of Defence (DoD – США) и Европейских космических предприятий (DLR – Германия, CNES – Франция и ESA Европейское космическое агентство).

Космические системы. Определение уровней и критериев оценки технологической готовности космических систем и их элементов (TRL)

1 Область применения

Данный стандарт устанавливает уровни технологической готовности (TRL_s). Область распространения стандарта относится в основном к аппаратной части космических систем, хотя в ряде случаев некоторые определения уровней можно использовать и в более широкой области применения.

Определение уровней технологической готовности позволяет получить те условия, которым должен отвечать каждый из уровней, допускающий их точную оценку.

2 Термины и определения

В рамках данного документа применимы следующие термины и определения.

2.1

макет

breadboard

физическая модель (2.10) необходимая для демонстрации функциональных возможностей и специальных (натурных) испытаний космической системы и ее элементов

2.2

критическая функция элемента

critical function of an element

основная функция элемента космической системы, требующая специальных мероприятий по технологической (2.19) проверке и испытаниям

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Например, когда либо элемент, либо его компонент применяются впервые и поэтому их возможности нельзя оценить, исходя из ранее полученных результатов, или при использовании элемента в новой области применения, например, при новых условиях окружающей среды или по новому назначению, в котором он ранее не проверялся.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 к статье: Независимо от назначения в данном международном стандарте, “критическая функция” всегда связана с “технологической критической функцией”, но не “критическая функция безопасности”.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 к статье: Независимо от назначения в данном международном стандарте, “критическая функция” всегда связана с “критической функцией элемента”.

2.3

критическая часть элемента

critical part of an element

часть элемента (2.4), которая связана с критической функцией

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Критическая часть элемента может представлять собой подмножество элементов, при этом технологическая проверка этой функции может осуществляться при специализированных испытаниях только критической части элемента.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 к статье: Независимо от назначения в данном международном стандарте, “критическая часть” всегда связана с “технологической критической частью”.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 к статье: Независимо от назначения в данном международном стандарте, “критическая часть” всегда связана с “критической частью элемента”.

2.4
элемент
element

составная часть космической системы, рассматриваемая с точки зрения оценки ее технологической готовности

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Элементом может быть компонент, часть оборудования, подсистема или система в целом.

2.5
функция (назначение) элемента
element function

действия, выполняемые *элементом* (2.4)

2.6
требования к характеристикам функционирования
functional performance requirements

составная часть требований к рабочим (эксплуатационным) характеристикам (2.14) элемента (2.4), определяемая назначением элемента (2.5)

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Требования к характеристикам функционирования элемента не обязательно включают в себя требования условий эксплуатации (2.11).

2.7
лабораторные условия
laboratory environment

условия, моделируемые на Земле, с целью демонстрации основных принципов и характеристик функционирования космической системы и ее элементов

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: лабораторные условия не обязательно учитывают требования условий эксплуатации (2.11).

2.8
отработанная технология
mature technology

технология, описанная рядом воспроизводимых процессов (2.17) конструирования, изготовления, испытаний и эксплуатации элемента (2.4) в соответствии с рядом требований, предъявляемых к их рабочим характеристикам (2.14) при реальных условиях эксплуатации (2.11).

2.9
целевые операции
mission operations

последовательность событий, которые задаются для выполнения конкретного задания

2.10
модель
model

физическое или абстрактное представление соответствующих аспектов элемента (2.4), как основы для расчетов, прогнозных оценок, испытаний или последующей оценки

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Термин "модель" также может быть использован для идентификации конкретных образцов космической системы или ее элемента, например летный образец (модель).

ПРИМЕЧАНИЕ 2 к статье: Термин взят из ISO 10795, определение 1.141.

2.11**условия эксплуатации
operational environment**

набор естественных и искусственно созданных условий, которые ограничивают применение элемента (2.4), начиная от технических требований к нему и заканчивая его использованием

ПРИМЕР 1 Естественные условия эксплуатации – погода, климат, физические особенности местности, растительность, пыль, свет, радиация и т.п.

ПРИМЕР 2 Искусственные условия эксплуатации – электромагнитные помехи, нагрев, вибрации, загрязняющие выбросы и т.п.

2.12**требования к эксплуатационным характеристикам
operational performance requirements**

часть требований к характеристикам (2.14) космической системы или ее элемента (2.4), определяющих функции элементов системы (2.5) в заданных условиях эксплуатации (2.11)

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Требования к эксплуатационным характеристикам задаются в техническом задании, охватывающем все этапы создания космической системы. Выполнение этих требований может быть подтверждено при наземных комплексных испытаниях системы, а также в процессе летных испытаний.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 к статье: Полный набор требований к элементу состоит из требований к эксплуатационным характеристикам и требований к техническим характеристикам.

2.13**технические характеристики
performance**

показатели элемента (2.4), наблюдаемые или измеряемые в процессе его эксплуатации или функционирования

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Показатели элемента, как правило, количественные.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 к статье: Термин взят из ISO 10795, определение 1.155.

2.14**требования к характеристикам
performance requirements**

набор параметров, характеризующих данный элемент (2.4)

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: В требованиях к характеристикам элемента обязательно должны оговариваться условия, в которых будет эксплуатироваться данный элемент. По этой причине характеристики элемента должны быть тесно связаны с поставленной задачей (задачами), а также с условиями эксплуатации космической системы, составной частью которой является данный элемент.

2.15**процесс
process**

совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих видов деятельности, преобразующая входы в выходы

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Входы одного процесса обычно являются выходами других процессов.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 к статье: Процессы в организации, как правило, планируются и осуществляются в контролируемых условиях с целью улучшения (критерия эффективности функционирования системы).

ПРИМЕЧАНИЕ 3 к статье: Процесс, в котором соответствие выходов заданным требованиям не может быть легко проверено часто называют "специальным процессом".

[ИСТОЧНИК: ISO 10795, определение 1.160]

2.16

релевантные условия эксплуатации **relevant environment**

минимальный набор *условий эксплуатации (2.11)*, который необходим для проверки наиболее важных (*критических*) функций в условиях эксплуатации (*2.11*) элемента (*2.2*)

2.17

повторяющийся процесс **reproducible process**

процесс (*2.15*), который может неоднократно повторяться.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Это понятие является основополагающим для определения “проверенная технология” и внутренне связанным с возможностью реализации этого процесса и его контроля.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 к статье: Элемент, являющийся уникальным (опытный образец элемента), даже если он отвечает всем предъявляемым требованиям, не может считаться основанным на *отработанной технологии*, если существует недостаточно высокая вероятность воспроизводства этого элемента в приемлемые сроки. И наоборот, отработанность, безусловно, вводит в определение термина “отработанная технология” понятие сроков. Технология, заявленная на сегодняшний день как «отработанная», в дальнейшем может ухудшаться до более низкого уровня готовности из-за устаревания компонентной базы или из-за прекращения существования специализированных организаций с уникальным практическим опытом, владевших данной технологией.

2.18

требование **requirement**

заданные потребность или ожидание, которые должны быть реализованы

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Термин взят из ISO 10795, определение 1.190.

2.19

технология **technology**

применение научных знаний, теоретических и практических методов, технических средств, профессионального мастерства для решения поставленной проблемы

2.20

валидация **validation**

подтверждение, через объективные доказательства, что требования (*2.18*) для конкретного предполагаемого использования или применения, выполнены

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Термин “валидация” используется для обозначения соответствующего статуса.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 к статье: Условия использования для проверки могут быть реальные или смоделированные.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 к статье: валидация может определяться сочетанием испытания, анализа, демонстрации и инспекции.

ПРИМЕЧАНИЕ 4 к статье: Валидация элемента подтверждает, что он способен выполнить свое предназначение с учетом условий эксплуатации (*2.11*).

ПРИМЕЧАНИЕ 5 к статье: Термин адаптирован с термином из ISO 10795, определение 1.228.

2.21

верификация **verification**

подтверждение посредством предоставления объективных доказательств, что установленные требования (*2.18*) были выполнены

ПРИМЕЧАНИЕ 1 к статье: Термин "верификация" используется для определения соответствующего статуса.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 к статье: Верификация может состоять из таких мероприятий, как: осуществление альтернативных расчетов, сравнивая новую спецификацию проекта с аналогичной спецификацией, проведения испытаний и демонстрации, и рассмотрения документов до их выпуска.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 к статье: Верификация может быть определена путем сочетания испытания, анализа, демонстрации и инспекции.

ПРИМЕЧАНИЕ 4 к статье: Верификация элемента подтверждает, что он соответствует проектной спецификации.

ПРИМЕЧАНИЕ 5 к статье: Термин адаптирован с термином из ISO 10795, определения 1.229.

3 Уровни технологической готовности (TRLs)

3.1 Основные положения

Технология для применяемого элемента достигает уровня отработанности, соответствующего уровню TRL 9 тогда, когда она становится четко заданной с помощью ряда воспроизводимых процессов конструирования, изготовления и испытания элемента, а также, когда элемент будет отвечать ряду требований к его техническим характеристикам в условиях эксплуатации.

Предполагается, что рассматриваемый элемент является физической частью системы, которая в общем случае может быть разбита на подсистемы (возможно, с несколькими подуровнями готовности). Элемент может быть любой частью этой системы, а не обязательно только ее специфической подсистемой или работающей при специфическом подуровне готовности.

Предварительным условием TRL-оценки является идентификация элемента, который является субъектом оценки. Более высокие TRL-уровни требуют задания требований к рабочим характеристикам элемента и поэтому требуют установления цели (задачи) для системы, в которой предполагается использовать данный элемент при заданных условиях эксплуатации.

К заданному элементу применима полная шкала TRL-уровней, поэтому у него не существует градаций по сложности при перемещении от низкого к более высокому TRL-уровню.

На более высоких TRL-уровнях предполагается, что элемент отработан и встроен в систему, в которой он будет проверяться и использоваться, поэтому TRL-уровень данного элемента может быть понижен, если он будет применяться в другой системе, если нельзя будет доказать, что все требования к условиям эксплуатации и сопряжению в новой системе эквивалентны или ниже требований в исходной системе.

Оценка TRL-уровня действительна для данного элемента в данный момент времени, но может изменяться в том случае, когда действовавшие на момент оценки условия перестали существовать. Подобная ситуация может приводить к повторной оценке TRL-уровня и его снижению, и возникать, в частности, в случае планируемой модернизации/изменения назначения этого элемента. Примеры тому – моральное устаревание элементов электронной техники, требующее их модификации, или производство элементов, требующее уже утраченных специальных знаний.

Время или усилия, необходимые для перехода с одного TRL-уровня на другой, зависят от рассматриваемой технологии и нелинейно связан с TRL-шкалой. Опыт показывает, что уровни могут сильно изменяться в зависимости от рассматриваемого элемента и поставленной задачи, поэтому, хотя TRL-шкала и является в данный момент адекватным средством оценки состояния технологической отработанности, она не может отражать усилия и затраты, необходимые для достижения следующего уровня.

Если уровень TRL 9 относится к полностью отработанной технологии, то более низкие TRL-уровни будут отражать тот факт, что не выполняется одно или несколько условий, необходимых для достижения самого высокого уровня, т.е.:

- a) Процессы производства элемента определены не полностью,
- b) Требования к условиям эксплуатации еще не полностью определены,
- c) Сам элемент еще не полностью определен,
- d) Элемент еще не до конца создан,
- e) Требования к условиям эксплуатации элемента еще не полностью обоснованы в рабочей среде.

Если элементом является тщательно разработанная система или подсистема, то ее удобно разделять на подэлементы, каждый из которых будет соответствовать некоторой специфической технологии. В этом случае технологическая отработанность элемента не может быть лучше, чем у отдельных элементов.

Для каждого уровня TRL будущий уровень требований к рабочим характеристикам элемента устанавливается в описании.

3.2 TRL 1 — Получение и задание основных принципов

3.2.1 Описание

Научное исследование существует относительно оцениваемой технологии и переходит в прикладное исследование и разработку. Основные принципы выводятся из академического исследования. Потенциальное использование определено, но еще не сформулировано.

На уровне TRL 1 технологию нельзя ассоциировать с какой-либо научной программой, т.к. концепция и использование формируется только на уровне TRL 2. Поэтому требования к рабочим характеристикам могут быть не установлены на этом уровне.

3.2.2 Примеры

Ниже приведены примеры TRL 1:

- a) В 1895 году немецкий физик Уильям Конрад Рентген открыл рентгеновские лучи (X-rays).
- b) В 1911 Хейке Камерлинг-Оннес открыл сверхпроводимость, показав внезапное исчезновение электрической сопротивляемости определенных материалов при определенной температуре.
- c) В октябре 2010 года ученые открыли второй в мире гигантский вирус, названный CroV. Этот вирус, который поражает одноклеточные морские организмы, считается огромным из-за размера его генома – приблизительно 730 тыс. базовых пар или генетических структурных элементов, более чем в два раза больше крупнейшего “нормального” вируса:

3.3 TRL 2 — Формулирование концепции технологии и/или использования

3.3.1 Описание

Как только выведены основные принципы, можно формулировать практическое применение. Применение может не быть доказано или не иметь детального анализа.

На уровне TRL 2 требования являются общими и определяются в общих чертах, но должна быть сформулирована хотя бы одна концепция или использование.

3.3.2 Примеры

Ниже приведены примеры TRL 2:

- a) Использование сверхпроводимых материалов, таких как алюминий или титан, в пределах

температуры сверхпроводимости предвидится для производства высокочувствительных болометрических детекторов. Ток, поданный к детектору, повышает температуру проводимого материала, из-за чего он становится не сверхпроводимым, и повышается его электрическая сопротивляемость. Это повышение сопротивляемости можно использовать для определения незначительных изменений в температуре и энергии.

- b) Сформирована концепция применения фотоэлектрического эффекта для производства электрогенераторов на солнечных батареях.

3.4 TRL 3 — Аналитическая и экспериментальная критическая функция и/или концепция с характеристиками

3.4.1 Описание

Доказательство концепции функциональности элемента основывается на анализах: моделировании, симуляции и испытаниях. Должны быть проведены аналитические исследования, лабораторные эксперименты, измерения, чтобы физически поддержать аналитические прогнозы и модели.

На уровне TRL 3 требуемые характеристики элемента являются общими, широко описанными и могут быть предварительными. Они должны соответствовать сформулированной концепции или использованию. Целевое назначение определяется в зависимости от состояния современных технологий. Требуемые функциональные характеристики элемента и цели устанавливаются и определяются в соответствии с текущим положением дел.

3.4.2 Примеры

Ниже приведены примеры TRL 3:

- a) Высокоэффективные солнечные панели из арсенида галлия (Gallium Arsenide) рассматриваются для применения в космосе при различных вариациях температур. Концепция основывается на улучшении технологии плавления. Для проверки жизнеспособности концепции производятся образцы панелей фотоэлементов и направляются на первоначальные испытания при воздействии окружающей звезды.
- b) Разрабатывается лазерный волоконно-оптический гироскоп с использованием оптических волокон для распространения света и эффектом Саньяка. Формулируется общая концепция работы источника лазера, волоконно-оптического узла и измерения фазы смещения. Выявляются принципы подачи лазера в оптическое волокно и улавливания сигналов с помощью целевых экспериментов.
- c) Разрабатывается двигатель химического возгорания в ракете с применением кислорода и водорода, хранящихся в жидком состоянии. Система впрыскивания топлива демонстрируется на испытательном стенде.

3.5 TRL 4 — Оценка функциональности компонента и/или модели в лабораторных условиях

3.5.1 Описание

Для демонстрации основной совместной работы элементов моделируется лабораторная модель элемента. Оценка приближительная, поскольку лабораторная модель далека от элемента полного масштаба.

На уровне TRL 4, как для TRL 3, требуемые характеристики элемента являются общими и широко описанными. Они должны быть в соответствии с потенциальным использованием системы. Требуемые функциональные характеристики элемента и цели устанавливаются и определяются в соответствии с текущим положением дел.

3.5.2 Примеры

Ниже приведены примеры TRL 4 (связанные с примерами для уровня TRL 3):

- a) Солнечные панели из арсенида галлия: лабораторные модели солнечных панелей производятся с использованием технологии панелей солнечных фотоэлементов и соединительных устройств. Лабораторные модели направляются на термальные испытания по сокращенной программе и на оценку функциональной работоспособности.
- b) Лазерный волоконно-оптический гироскоп: строится модель с лазерным диодом, оптическим волокном и системой улавливания сигналов. Измерение угловой скорости демонстрируется в лаборатории за ось вращения.
- c) Двигатель химического возгорания с двойным топливом: производится аналог двигателя и демонстрируется тяга двигателя в окружающей среде.

3.6 TRL 5 — Оценка критической функции компонента и/или модели в релевантной среде

3.6.1 Описание

Уровень 5 TRL достигается, когда продемонстрированы критические функции элемента в соответствующей среде с помощью лабораторных моделей, которые обычно не полномасштабные или не полнофункциональные. Эксплуатационный тест должен соответствовать аналитическим прогнозам.

На уровне TRL 5 рассматриваемый объект и условия эксплуатации являются предварительными, но в достаточной степени ясны и понятны для определения рабочих характеристик элемента, соответствующей среды и предварительного проекта элемента. Упущенные или неполные требования допустимы на данном уровне, поскольку не оказывают влияния на критические функции элемента и соответствующий план верификации.

Для перехода на уровень TRL 5 критические функции элемента должны быть определены, по соответствующим требованиям, и установлены подтверждение и соответствие условиям эксплуатации. Для идентификации критической функции должны быть определены требования, сформирован план верификации, проведены испытания на модели.

Лабораторные модели можно смоделировать согласно требованиям оценки критической функции, но они должны представлять элемент, по мере необходимости определить неопределенные величины и продемонстрировать работоспособность элемента.

Допустимо, что неизвестные критические функции могут быть отнесены к требованиям к рабочим характеристикам. Например, эксплуатационный параметр или расчетный параметр может быть неизвестен или не точно определен, несмотря на то, что точно взаимосвязан с критической функцией и с вполне определенной задачей требований к рабочим характеристикам. Для такого особого случая демонстрация функционального макета должна уменьшить неопределенность по данному параметру с возможной обратной связью по расчетам элементов.

Когда достигнут уровень TRL 5, критические функции демонстрируются в зависимости от использования элемента, поскольку важные функции и производительность проверяются при помощи макетных испытаний в соответствующих условиях эксплуатации. Рабочие характеристики элемента часто консолидированы на данном этапе, с учетом макетных испытаний. Однако, элемент не проработан в полной мере из-за отсутствия полномасштабной модели. Есть также оставшиеся риски, связанные со сбоями в выявлении критически важных функций, отсутствием полноты в соответствующем верификационном плане и/или недооценка взаимодействий между элементами детали.

3.6.2 Примеры

Ниже приведены примеры TRL 5:

- a) Предложен космический телескоп для наблюдения за космическими объектами в дальнем космосе

в ИК-диапазоне с системой двойного зеркала длиной 3,5 метра в поперечнике и работающий при мощности 70 К. Главное зеркало параболическое и сделано из 12-ти сегментов из карбида кремния, спаянных между собой при высокой температуре. Оптические характеристики при низкой температуре определяются как критическая функция, а главное зеркало длиной 3,5 метра в поперечнике как критическая часть. Изготовлена лабораторная модель в виде сферического зеркала длиной 1,3 метра в поперечнике и измеряется при мощности 70 К с целью продемонстрировать оптические характеристики при низких температурах. Лабораторная модель изготовлена из 9-ти спаянных сегментов тем же способом, которым будет изготавливаться элемент для полета. Предположительная работа такого телескопа основывается на результатах испытаний модели математическими расчетами.

- b) Для исследования космоса в ИК-диапазоне предлагается раскладной космический телескоп длиной 6 метров в поперечнике и работающий с мощностью 30 К. Для оценки качества работы и выбора материала была изготовлена серия зеркал из различных материалов длиной 1 метр и протестирована при 30 К. По результатам испытаний будет оценено основное зеркало.
- c) Для ракетносителей на уровне TRL 5 производятся испытания на уровне уменьшенного масштаба. Например, для повторного зажигания верхней ступени испытания проводятся в наземных условиях на уровне уменьшенного масштаба системы регулирования подачи топлива, чтобы определить разработку данной верхней ступени, так как не предусмотрены испытания на уровне полного масштаба для демонстрации расчетных условий работы на входном турбонасосе при повторном зажигании.

3.7 TRL 6 — Критические функции испытания модели в релевантной среде

3.7.1 Описание

TRL 6 достигается, когда критические функции элемента оценены в соответствующих условиях эксплуатации. Для этой цели используются модели полета с аналогичными физическими, функциональными и эксплуатационными характеристиками, чтобы продемонстрировать критические функции и объективно продемонстрировать работу элемента. Испытания должны проходить в соответствии с аналитическими прогнозами.

На уровне TRL 6, как верхнем уровне, цель программы, условия эксплуатации и требования к рабочим характеристикам установлены и согласованы с заинтересованными сторонами с учетом интеграции элемента в конечной системе.

Модель демонстрирует работу элемента и его компонентов в целом. Особенно на этом этапе важно установить схему дальнейших разработок элемента. Могут быть риски разработки относительно работы элемента: ошибка идентификации критических функций, незаконченность плана оценки, и/или недооценка эффекта связи частей элемента, из-за чего нельзя определить неопределенные величины.

3.7.2 Примеры

Ниже приведены примеры TRL6:

- a) Допплеровский лазерный локатор предлагается для измерения скорости ветра из космоса. Он состоит из лазера высокой мощности, телескопа для распространения лазерного луча, большого телескопа с двойным зеркалом для принятия сигнала, радиоприемника, и электронного блока управления. Время службы аппарата определяется как критическая функция из-за неопределенности срока службы лазера. Система лазера это соответствующая критическая часть локатора. Для демонстрации срока службы модель телескопа производится и испытывается по общей шкале в релевантной среде (например, в вакууме с мощным импульсным режимом).
- b) Камера дистанционного зондирования состоит из большого телескопа 3 метра в поперечнике, блока улавливания сигнала, системы его охлаждения и электронного блока управления. Оптические характеристики на орбите определяются как критическая функция, потому что расстояние между основным и второстепенным зеркалами должно быть стабильным, не

колебаться более чем на 1 микрометр. Соответствующая критическая часть составляет два зеркала и структуру, их поддерживающую. Лабораторная модель на уровне полного масштаба, состоящая из двух зеркал и поддерживающей структуры строится и испытывается в релевантной среде (например, в термоэластичных искажениях и вибрациях) для демонстрации необходимой стабильности, которую можно эффективно создать предлагаемыми технологиями.

- с) Для ракетносителя на уровне 6 TRL демонстрируется доступность технологии, по которой решается, разрабатывать ли ступени запуска на уровне полного масштаба. Например, на ступени повторного запуска, демонстрация регулировки подачи топлива на уровне полного масштаба при “нулевой гравитации” обычно запрашивается для принятия решения разработки верхней ступени с допустимыми рисками.

3.8 TRL 7 — Демонстрационная модель в условиях эксплуатации

3.8.1 Описание

Для уровня 7 TRL требуется оценка работоспособности элемента соответствующими испытаниями, чтобы продемонстрировать его работу в соответствующей среде эксплуатации.

На уровне TRL 7 цель миссии, условия эксплуатации и требования к рабочим характеристикам установлены и согласованы заинтересованными сторонами с учетом интеграции элемента в конечной системе.

Для перехода на уровень TRL 7 демонстрационная модель, полностью соответствует всем требованиям проекта летной модели, эксплуатируется в среде, которая соответствует всем необходимым характеристиками реальной среде эксплуатации, чтобы продемонстрировать, как модель будет вести себя в такой среде.

Когда демонстрационная модель полностью отработана на земле, элемент модели направляется на серийные испытания, которые проводятся с учетом адекватного запаса. По этой причине, данная модель не предназначена для использования в полете. Однако, в некоторых случаях процесс испытания и запас адаптированы под модель, предназначенную для полета.

Когда условия эксплуатации являются обязательными для определения соответствия техническим требованиям, модель является первой презентацией элемента, который предназначен для полета.

3.8.2 Примеры

Ниже приведены примеры TRL 7:

- a) Обычно космическим приборам или оборудованию требуется достичь этого уровня перед их интеграцией в космический аппарат, пройдя соответствующие испытания на соответствие техническим требованиям. Этими приборами могут быть астроориентатор, система многоуровневой изоляции, блок питания, блок распределения электроники, компьютер и тд. Испытания на соответствие техническим требованиям на уровне прибора проводятся в среде, которая будет внутри космического аппарата.
- b) В некоторых случаях элементу не достаточны только наземные испытания и требуются полные испытания в соответствующей среде. Это относится к ракетносителям, когда только первый полет может быть испытанием на соответствие техническим требованиям, показывающим работу в соответствующей среде. Также это может относиться к некоторым специфическим приборам, для которых требуются испытания в условиях гравитации, которые невозможно провести на Земле.
- с) Оборудование может быть передано на уровень TRL 7 в процессе сборки космического аппарата в рамках одной программы, или самостоятельно, путем целенаправленных инвестиций. Однако, если оборудование предполагается использовать для другой программы на более поздней стадии, уровень TRL, возможно, должен быть пересмотрен, как говорилось в Разделе 4. Для подтверждения уровня TRL 7 могут понадобиться дополнительное оборудование или дополнительные демонстрационные испытания.

3.9 TRL 8 — Конечная система разработана и прошла летную квалификацию испытаниями и демонстрацией

3.9.1 Описание

Элемент, прошедший испытания на соответствие техническим требованиям, интегрируется в конечную космическую систему, готовую к запуску.

На уровне TRL 8 цель программы, условия эксплуатации и требования к рабочим характеристикам установлены и согласованы заинтересованными сторонами с учетом интеграции элемента в конечной системе.

Для перехода на уровень TRL 8 система, включая элемент, должна быть допущена к старту. Вся техника, предназначенная для конечных космических систем, идет через уровень TRL 8.

3.9.2 Пример

Уровень достигается всеми элементами после подтверждения готовности полета космического аппарата.

3.10 TRL 9 — Конечная система, прошедшая летную квалификацию удачными испытаниями

3.10.1 Описание

Элемент, прошедший испытания на соответствие техническим требованиям, интегрируется в конечную космическую систему в рамках соответствующей научной программы.

На уровне TRL 9 цель программы, условия эксплуатации и требования к рабочим характеристикам установлены и согласованы заинтересованными сторонами с учетом интеграции элемента в конечной системе.

Уровень TRL 9 достигнут и элемент считается отработанным после удачной работы в реальных условиях эксплуатации.

3.10.2 Пример

Этот уровень достигается всеми космическими аппаратами после удачного ввода в эксплуатацию в операционной службе.

4 Сводная таблица

В таблице 1 представлены уровни технологической готовности с описаниями. Во второй колонке описываются этапы, достигнутые на каждом уровне, в третьей дается информация, которая должна быть задокументирована для получения соответствующего уровня. Детальные процедуры для оценки TRL уровней определяются в соответствующей среде организациями или институтами, ответственными за данную работу.

Таблица 1 – Сводная таблица уровней TRL: Этапы и результаты работ

Уровень TRL	Этап	Результаты (задокументированные)
TRL 1 – выведение основных принципов	Потенциальное использование элемента определено исследованиями, но концепция еще не сформулирована.	Изложение основных принципов для использования. Установление потенциального использования.
TRL 2 – формулирование концепции технологии и/или использования	Сформулированы потенциальное использование элемента и концепция, но концепция не доказана.	Формулировка потенциального использования элемента. Предварительная проработка проекта элемента, формулировка применения основных принципов.
TRL 3 – аналитическая и экспериментальная критическая функция и/или концепция с доказательствами характеристик	Концепция частично разработана и ожидаемая работа демонстрируется аналитическими моделями при поддержке экспериментальных данных/характеристик.	Предварительные требуемые характеристики (могут подойти для нескольких научных программ), включая требования функциональных характеристик. Концептуальный проект элемента. Экспериментальные данные, результаты лабораторных экспериментов. Аналитическая модель элемента для подтверждения концепции.
TRL 4 – оценка функциональности компонента и/или модели в лабораторных условиях	Демонстрируется работа элемента лабораторными испытаниями.	Предварительные требуемые характеристики (могут подойти для нескольких научных программ) с требованиями функциональных характеристик. Концептуальный проект элемента. План испытаний функциональных характеристик. Оценка функциональных характеристик с помощью лабораторной модели. Отчет лабораторных испытаний.
TRL 5 – оценка критической функции компонента и/или модели в релевантной среде.	Определены критические функции элемента и соответствующая релевантная среда. Лабораторные модели не полномасштабные и подготовлены для испытаний в релевантной среде. Результаты выводятся в зависимости от испытаний	Определение предварительных требуемых характеристик и релевантной среде. Идентификация и анализ критических функций элемента. Предварительная разработка элемента, оцениваются критические функции его лабораторной модели. План испытаний критических функций. Анализ результатов испытаний. Оценка критической функции с помощью лабораторной модели. Отчет лабораторных испытаний.

Уровень TRL	Этап	Результаты (задокументированные)
TRL 6 – критические функции испытания модели в релевантной среде	Критические функции элемента оценены, физические, характеристики продемонстрированы в релевантной среде и пригодная модель представлена.	<p>Определение требуемых характеристик и релевантной среды.</p> <p>Идентификация и анализ критической функции элемента.</p> <p>Разработка элемента, оцениваются критические функции его лабораторной модели.</p> <p>План испытаний критической функции.</p> <p>Описание модели для оценки критических функций.</p> <p>Отчет испытаний модели.</p>
TRL 7 – испытания модели на соответствие техническим требованиям или испытания с прототипом в условиях эксплуатации	Характеристики демонстрируется в условиях эксплуатации – на земле, или, если необходимо, в космосе. Пригодная модель (полностью содержит все аспекты проекта летной модели) разработана и испытана в разумных пределах для демонстрации характеристик в условиях эксплуатации.	<p>Определение требуемых характеристик, включая условия эксплуатации.</p> <p>Определение и разработка модели.</p> <p>План испытаний модели.</p> <p>Отчет об испытаниях модели.</p>
TRL 8 – конечная система разработана и прошла летные испытания	Летная модель прошла испытания на соответствие техническим требованиям и интегрирована в конечную систему, готовую к запуску.	<p>Летная модель разработана и интегрирована в конечную систему.</p> <p>Одобрение запуска конечной системы.</p>
TRL 9 – конечная система, удачно прошедшая летные испытания	Технология признана отработанной. Элемент успешно работает в соответствующей научной программе в реальных условиях эксплуатации.	<p>Ввод в эксплуатацию.</p> <p>Отчет об эксплуатации на орбите.</p>

Библиография

- [1] ISO 10795, *Космические системы. Программное управление и качество. Словарь терминов*

