ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСТ Р 57700.38— 2024**

## Компьютерные модели и моделирование

# ВАЛИДАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

## Определение параметров выносливости конструкции

**Издание официальное**

**Москва**
**Российский институт стандартизации**
**2024**

gost.e-ecolog.ru

## Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным унитарным предприятием «Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

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 18 января 2024 г. № 21-ст

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», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном 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 (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2024

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

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Компьютерные модели и моделирование**

# ВАЛИДАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

**Определение параметров выносливости конструкции**

Computer models and simulation.
Software validation. Definition of constructions fatigue strength parameters

**Дата введения — 2024—06—01**

## 1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает общие требования к валидации программного обеспечения компьютерного моделирования, применяемого для расчетного определения параметров выносливости высокотехнологичных конструкций, выполненных из металлических материалов, работающих под действием циклических эксплуатационных термомеханических воздействий (в диапазоне температур и внешних нагрузок, при которых влиянием ползучести, длительной прочности можно пренебречь).

На основе настоящего стандарта допускается, при необходимости, разрабатывать стандарты, учитывающие особенности программного обеспечения для определения параметров выносливости конкретных видов конструкций в различных научных и промышленных отраслях в зависимости от их специфики.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 25.502 Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость

ГОСТ 23207 Сопротивление усталости. Основные термины, определения и обозначения

ГОСТ Р 57188 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения

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

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

ГОСТ Р 57700.24 Компьютерные модели и моделирование. Валидационный базис

ГОСТ Р 57700.25 Компьютерные модели и моделирование. Процедуры валидации

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

**Издание официальное**

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.

## 3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 23207, ГОСТ Р 57188, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **аттестованное программное обеспечение:** Программное обеспечение, прошедшее регламентированную процедуру признания возможности его использования в заявленной области/границах применения и получения по нему значений расчетных параметров с определенной погрешностью, завершившуюся выдачей свидетельства (аттестационного паспорта).

Примечание — Процедура приведена в [1].

3.2

**валидационный базис:** Упорядоченная система данных, содержащая результаты натурных экспериментов и результаты компьютерного моделирования, которые позволяют доказать с заданной точностью соответствие компьютерной модели или программного обеспечения компьютерного моделирования объекту моделирования.

[ГОСТ 57700.24—2020, пункт 3.1.4]

3.3

**валидация ПО КМ:** Процесс определения соответствия программного обеспечения компьютерного моделирования (компьютерной модели, программы) реальному миру. Валидация обеспечивает обоснование того, что программное обеспечение компьютерного моделирования в заявленной области применения позволяет правильно и с определенной точностью моделировать реальные процессы.

[ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.4]

3.4

**верификация ПО КМ:** Процесс определения соответствия программного обеспечения компьютерного моделирования (компьютерной модели, программы) математической модели. Верификация обеспечивает обоснование того, что программное обеспечение компьютерного моделирования при определенных параметрах рассчитывает математическую модель правильно и с соответствующей точностью.

[ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.3]

3.5 **двухчастотное нагружение:** Нагружение при котором на цикл малой частоты накладывается высокочастотный цикл нагружения.

3.6 **деградация материалов:** Постепенное ухудшение характеристик материалов относительно их начальных значений в процессе нагружения.

3.7

**качество программного средства:** Совокупность свойств программного средства, которые обусловливают его пригодность удовлетворять заданные или подразумеваемые потребности в соответствии с его назначением.

[ГОСТ 28806—90, статья 6]

3.8 **метрика соответствия:** Качественные и количественные показатели, которые отражают степень соответствия результатов компьютерного моделирования и эталонных решений.

Примечание — Выбор метрик соответствия определяют для конкретной модели поведения материала.

3.9 **модель поведения материала:** Совокупность функциональных зависимостей (а также набор их параметров), описывающих поведение материала в условиях термомеханического нагружения.

3.10

**программное обеспечение компьютерного моделирования;** ПО КМ: Программы, выполняющие математические расчеты, и программы, предназначенные для подготовки исходных данных, обработки результатов расчета, а также другие вспомогательные программы. Программное обеспечение компьютерного моделирования не является программным обеспечением средств измерений согласно ГОСТ Р 8.654.

[ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.1]

3.11 **программное обеспечение, применяемое для расчетного определения параметров выносливости;** ПО ПВ: вид программного обеспечения компьютерного моделирования, реализующего математические модели или инженерные методики, позволяющие на основе экспериментальных данных (данных мониторинга) или данных, полученных из решения краевых задач, моделирующих условия нагружения рассматриваемого объекта, проводить определение параметров выносливости.

3.12 **противофазное нагружение:** Термомеханическое нагружение, при котором изменение температуры и изменение механической деформации происходит в противофазе (наибольшая температура соответствует минимальной амплитуде механической деформации).

Примечание — Данный вид нагружения характерен при испытаниях материалов (на малоцикловую усталость), предназначенных для работы в термически нестабильной среде.

3.13 **синфазное нагружение:** Термомеханическое нагружение, при котором изменение температуры происходит в фазе с изменением механической деформации (наибольшая температура соответствует наибольшей амплитуде механической деформации).

Примечание — Данный вид нагружения характерен при испытаниях материалов (на малоцикловую усталость), предназначенных для работы в термически нестабильной среде.

## 4 Общие положения

4.1 Валидация ПО ПВ обеспечивает обоснование того, что в заявленной области применения ПО ПВ позволяет с заданной точностью моделировать физические процессы, характерные для циклического деформирования и разрушения конструкций, а также с заявляемой погрешностью рассчитывать параметры выносливости конструкции.

Примечание — Валидация ПО ПВ может быть направлена на обоснование возможности с заданной точностью моделировать процесс накопления усталостных повреждений и усталостного разрушения материала при циклическом нагружении конструкции и/или оценку усталостной или циклической долговечности.

4.2 Валидация ПО ПВ выполняется путем сравнения значений параметров, полученных в результате моделирования процесса нагружения конструкции, и соответствующих значений экспериментальных данных, и/или значений из валидационного базиса (ВБ), и/или значений, полученных при использовании иных верифицированных и валидированных программных средств в заявленной области моделирования.

4.3 Общие требования к валидации программного обеспечения (ПО), применяемого для расчетного определения параметров выносливости конструкций — по ГОСТ Р 57700.23, ГОСТ Р 57700.25.

4.4 Документом, обосновывающим возможность применения ПО ПВ в заявленной области моделирования, является отчет о верификации и валидации ПО ПВ по ГОСТ Р 57700.1.

4.5 Настоящий стандарт не распространяется на методы и математические модели, заложенные в ПО ПВ.

4.6 Перед проведением валидации ПО ПВ необходимо провести его верификацию.

## 5 Требования к порядку валидации программного обеспечения, применяемого для определения выносливости конструкции

5.1 Валидация ПО ПВ осуществляются в три этапа:

- на первом этапе определяют соответствующие требования, проводят анализ и формирование данных (при необходимости) ВБ;

- на втором этапе выполняют численное моделирование параметров выносливости конструкции и проведение валидационного сравнения;
- на третьем этапе проводят оценку результатов валидационного сравнения.

### 5.2 Порядок проведения этапа 1

5.2.1 Определяют:

а) область и пределы применения ПО ПВ по условиям и параметрам расчета.

***Примеры***

***1 Доминирующий механизм деградации материала: малоцикловая усталость, многоцикловая усталость или ПО ПВ, которое предназначено для анализа сопротивления усталости как в области малоциклового, так и многоциклового нагружения, с учетом переходной области, в которой одновременно действуют оба механизма деградации материала.***

***2 Диапазон изменения температур (с указанием возможности или невозможности расчета неизотермических режимов нагружения).***

***3 Границы применимости по задаваемым эксплуатационным нагрузкам;***

б) основные явления и эффекты, характерные для процессов, моделируемых с помощью ПО ПВ;

в) перечень анализируемых расчетных параметров.

Примечание — Рекомендуется проводить анализ циклической или усталостной долговечности.

5.2.2 Формируют ВБ для валидируемого ПО ПВ на основании имеющихся соответствующих значений экспериментальных данных, и/или значений, содержащихся в ВБ, и/или значений, полученных при использовании иных верифицированных и валидированных программных средств в заявленной области моделирования. Общие требования к структуре и содержанию ВБ — по ГОСТ Р 57700.24.

5.2.3 В ВБ ПО ПВ включают постановки задач, соответствующих явлениям и эффектам, моделируемым в данном ПО ПВ.

Перечень рекомендуемых постановок задач для включения в ВБ:

а) «Изотермическое нагружение», содержащее следующие разделы:

1) раздел «Построение кривой усталости», содержащий анализ циклической долговечности гладких образцов круглого или прямоугольного сечения (в соответствии с ГОСТ 25.502) при одноосном растяжении-сжатии с контролируемой амплитудой деформации или напряжения. Рекомендуется рассмотреть минимум три различных значения контролируемой амплитуды деформации/или напряжения в цикле нагружения.

Примечание — Если ПО ПВ, предназначено для анализа только малоцикловых нагружений, то рекомендуется провести моделирование эксперимента по построению кривой малоцикловой усталости. Если ПО ПВ предназначено для анализа только многоцикловых нагружений, то рекомендуется провести моделирование эксперимента по построению кривой многоцикловой усталости. Если ПО ПВ предназначено для анализа малоциклового и многоциклового нагружения, с учетом переходной области, то рекомендуется провести моделирование эксперимента по построению полной кривой усталости. При возможности рекомендуется решить задачу для нескольких значений постоянной температуры цикла;

2) раздел «Блочное нагружение», содержащий анализ усталостной долговечности гладких образцов круглого или прямоугольного сечения (в соответствии с ГОСТ 25.502) при блочном нагружении с двумя и более блоками нагружения разного уровня, реализующихся в разном порядке;

3) раздел «Анализ влияния закона нагружения», содержащий анализ влияния на циклическую долговечность гладких образцов круглого или прямоугольного сечения (в соответствии с ГОСТ 25.502) закона нагружения.

Примечание — Рекомендовано к рассмотрению одноосное растяжение-сжатие (с симметричным и ассиметричным циклом нагружения), знакопеременное кручение и совместное действие растяжения-сжатия и знакопеременного кручения;

4) раздел «Двухчастотное нагружение», содержащий анализ усталостной долговечности гладких образцов круглого или прямоугольного сечения (в соответствии с ГОСТ 25.502) при двухчастотном нагружении.

Примечание — Моделирование данного эксперимента рекомендуется, если ПО ПВ предназначено для анализа малоциклового и многоциклового нагружения, с учетом переходной области;

5) раздел «Исследование усталостной долговечности конкретного конструктивного узла (или специальных образцов, моделирующих работу конструктивных узлов)» при различных законах (двух и более) циклического нагружения;

б) «Неизотермическое нагружение», содержащее следующие разделы:

1) раздел «Термомеханическое нагружение», содержащий анализ усталостной долговечности гладких образцов круглого или прямоугольного сечения (в соответствии с ГОСТ 25.502) при термомеханическом синфазном и противофазном нагружении;

2) Раздел «Исследование усталостной долговечности конкретного конструктивного узла (или специальных образцов, моделирующих работу конструктивных узлов)» при различных законах (двух и более) циклического нагружения.

Перечень литературных источников, содержащих постановки задач и результаты экспериментов, которые могут быть включены в ВБ приведен в приложении А.

### 5.3 Порядок проведения этапа 2

5.3.1 Проводят численное моделирование задач, включенных в ВБ, с помощью рассматриваемого ПО ПВ и валидационное сравнение, результаты которого оформляются в виде раздела соответствующего отчета по ГОСТ Р 57700.1.

5.3.2 Результаты экспериментов и расчетов с использованием ранее валидированного ПО КМ, включаемые в ВБ для выполнения валидационного сравнения с результатами расчетов по ПО ПВ, должны быть документально оформлены (например, опубликованные материалы, отчеты организаций, протоколы испытаний, проектная, конструкторская документация, сертификаты).

Примечание — При отсутствии документально оформленных результатов экспериментальных данных, данных ВБ и/или данных, полученных при использовании иных верифицированных и валидированных программных средств в заявленной области моделирования проводят эксперименты с целью подтверждения функциональности ПО ПВ.

5.3.3 В постановках задач, включенных в ВБ ПО ПВ, указывают:

- режимы, технологические процессы, и/или состояния объекта (его элемента), и/или виды воздействия на объект, моделируемые с применением ПО ПВ;
- физические процессы и/или явления, происходящие при рассматриваемых режимах, состояниях объекта (его элемента) и/или видах воздействия на объект, подлежащие проверке;
- модели поведения материалов, используемые при проведении моделирования с помощью ПО ПВ с указанием всех значений параметров применяемых моделей. Рекомендуется также указывать ссылку на источник информации, на основании которого были получены приведенные параметры;
- экспериментальные и/или расчетные данные, служащие для проверки ПО ПВ, в которых воспроизведены приведенные рассматриваемые режимы, технологические процессы, и/или состояния объекта (его элемента), и/или виды воздействия на объект. В качестве расчетных данных, служащих для проверки данного ПО ПВ, могут быть использованы результаты расчетов, выполненные с помощью ПО ПВ, ранее прошедшие валидацию для рассматриваемой (или расширенной) области и пределы применения по условиям и параметрам расчета.

***Пример — Результаты расчетов, выполненные с помощью аттестованного для данной области и пределов применения по условиям и параметрам расчета программного обеспечения;***

- описание метрик соответствия для оценки различия между результатами численного моделирования и экспериментальными данными, и/или данными ВБ, и/или данными, полученными при использовании иных верифицированных и валидированных программных средств в заявленной области моделирования.

***Пример — Описание метрики соответствия в соответствии с требованиями к последующему применению ПО ПВ значимости результатов моделирования. В качестве метрик соответствия могут быть выбраны, например, абсолютное отклонение, относительное отклонение или среднеквадратичное отклонение.***

5.3.4 Отсутствие или наличие документально оформленных экспериментальных данных и/или данных ВБ отражают в разделе отчета по верификации и валидации ПО ПВ, оформленному по ГОСТ Р 57700.1. При отсутствии указанных данных для валидационного сравнения используют результаты, полученные с помощью верифицированного и валидированного ПО ПВ, в заявленной области моделирования.

5.3.5 В качестве результатов валидации ПО ПВ для каждого значения моделируемого параметра конструкции, включенного в ВБ, приводят результаты сопоставлений значений параметров расчетов, выполненных с помощью ПО ПВ с экспериментальными данными, и/или данными ВБ, и/или данными, полученными при использовании иных верифицированных и валидированных ПО ПВ в заявленной области моделирования по заданным условиям и параметрам расчета. Сопоставление результатов проводят в соответствии с выбранными метриками. Результаты валидации ПО ПВ должны содержать качественную и количественную оценку достоверности. Результаты валидации ПО ПВ в виде соответствующего раздела отчета оформляют по ГОСТ Р 57700.1.

5.3.6 Рекомендуется использовать следующие критерии качества ПО ПВ:

- качественное согласие результатов компьютерного моделирования с экспериментальными данными, и/или данными ВБ, и/или данными, полученными при использовании иных верифицированных и валидированных ПО ПВ в заявленной области моделирования для рассматриваемой (или расширенной) области и пределов применения по условиям и параметрам расчета;
- максимальное расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает статистический «разброс» экспериментальных данных, объясняемый стохастической природой явления усталости и «разбросом» значений физико-механических свойств материалов.

Примечание — При проведении валидационного сравнения необходимо использовать одновременно оба критерия качества ПО ПВ, а также другие критерии (при необходимости).

5.4 Третий этап валидации программного ПО ПВ включает проведение оценки результатов численного моделирования по ГОСТ Р 57700.25 и валидационного сравнения.

5.5 Анализ оценки результатов валидации ПО ПВ служит основой для принятия решения о возможности (допустимости) его применения для моделирования физических процессов и расчета необходимых параметров выносливости для рассматриваемой области и пределов применения, а также установления точности моделирования.

**Приложение А**
**(рекомендуемое)**

## Перечень литературных источников, содержащих постановки задач и результаты экспериментов, которые могут быть включены в валидационный базис

### А.1 Построение кривых усталости

Хамаза Л.А., Коваленко В.А. Сопротивление металлов усталостному разрушению и деформированию при двухчастотном нагружении. Сообщение 1. Методика и результаты исследования усталости и неупругости металлов при двухчастотном циклическом нагружении // Проблемы прочности. — 1989. — № 10. — С. 7—13

Шишулин Д.Н., Коротких Ю.Г., Волков И.А., Волков А.И. Экспериментально-теоретическое исследование усталостной долговечности стали 08Х18Н10Т при регулярном и блочных циклических нагружениях // Проблемы прочности и пластичности. — 2014. — Т. 76. — С. 6—17

Волков И.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов усталостной долговечности материалов и конструкций при малоцикловом нагружении // Механика твердого тела. Известия РАН. — 2014. — № 3. — С. 66—78

### А.2 Блочное нагружение

Бернард-Конноли М., Бью Куок Т. Усталость коррозионностойкой стали 304 при испытаниях в условиях многоступенчатой контролируемой деформации // Теоретические основы инженерных расчетов. — 1983. — № 3. — С. 47—53

Шишулин Д.Н., Коротких Ю.Г., Волков И.А., Волков А.И. Экспериментально-теоретическое исследование усталостной долговечности стали 08Х18Н10Т при регулярном и блочных циклических нагружениях // Проблемы прочности и пластичности. — 2014. — Т. 76. — С. 6—17

### А.3 Влияние закона нагружения

Казаков Д.А., Капустин С.А., Коротких Ю.Г. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 1999

Sosie D. Critical plane approaches for multiaxial fatigue damage assessment // American society for testing and materials. — 1993. — No. 1191. — Pp. 7—36

Yand X. Low cycle fatigue and cyclic stress ratheting failure behavior of carbon steel 45 under uniaxial cyclic loading // International Journal of Fatigue. — 2005. — No. 27. — Pp. 1124—1132

### А.4 Двухчастотное нагружение

Хамаза Л.А., Коваленко В.А. Сопротивление металлов усталостному разрушению и деформированию при двухчастотном нагружении. Сообщение 1. Методика и результаты исследования усталости и неупругости металлов при двухчастотном циклическом нагружении // Проблемы прочности. — 1989. — № 10. — С. 7—13

### А.5 Термомеханическое нагружение

Темис Ю.М., Азметов Х.Х., Факеев А.И. Моделирование малоцикловой усталости при неизотермическом нагружении // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2013. — Вып. 4. — С. 1—13

Liang Jin, Pellox R.M., Xie Xisman. Thermomechanical fatigue behavior of a nickel base superalloy // Chin. J. Met. Sci. Technol. — 1989. — V.5. — Pp. 1—7

Kalluri S., Bonacuse P.J. An axial-torsional termomechanical fatique testing technique // Symposium on multiaxial fatique and deformation testing techniques: Denver, Colorado, 1995

## Библиография

[1] Приказ Ростехнадзора от 30 июля 2018 г. № 325 «Об утверждении порядка проведения экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии»

УДК 001.4:004:006.354 ОКС 01.040.01

Ключевые слова: программное обеспечение компьютерного моделирования, валидация, параметры выносливости, валидационный базис, нагружение

Редактор *Н.В. Таланова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *С.И. Фирсова*
Компьютерная верстка *Е.А. Кондрашовой*

Сдано в набор 19.01.2024. Подписано в печать 29.01.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,18.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru