ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 57700.11— 2018

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Процессы ударного взаимодействия. Верификация и валидация численных моделей низкоскоростных ударов и внедрений. Требования

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2018

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Закрытым акционерным обществом «Т-Сервисы» (ЗАО «Т-Сервисы»)

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 6 февраля 2018 г. № 51-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 ежемесячном информационном указателе «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

© Стандартинформ, 2018

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
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 1
4 Обозначения и сокращения 2
5 Требования к моделям поведения материалов при низкоскоростном ударном нагружении 2
6 Требования к процедуре валидации моделей поведения материалов при низкоскоростном ударном нагружении 2
7 Требования к численной расчетной модели и результатам численного моделирования 3
8 Требования к процедуре валидации численной расчетной модели 5
Приложение А (рекомендуемое) Структура матрицы валидации модели поведения материала при низкоскоростном ударе 7
Приложение Б (рекомендуемое) Структура матрицы валидации численной расчетной модели низкоскоростного удара 7
Библиография 8

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Процессы ударного взаимодействия. Верификация и валидация численных моделей низкоскоростных ударов и внедрений. Требования

Numerical modeling of physical processes. Processes of impact interaction.
Verification and validation of numerical models of low-velocity impacts and penetrations. Requirements

Дата введения — 2019—01—01

1 Область применения

В рамках настоящего стандарта регламентируются требования к процедурам валидации моделей деформирования твердых тел при низкоскоростных ударах различной интенсивности.

В качестве области определения настоящего стандарта следует рассматривать процессы ударного взаимодействия, сопровождающиеся деформированием и повреждением материалов и конструкций в условиях низких скоростей взаимодействия с характерным временем взаимодействия в несколько секунд и более. Характерной особенностью таких процессов является отсутствие зависимости свойств материалов от скоростей деформаций, изотермические условия протекания, отсутствие ударно-волновых явлений. Такие процессы могут сопровождаться локальным разрушением материалов и конструкций, большими пластическими деформациями, образованием трещин.

В рамках стандарта также вводятся общие требования к формату численных моделей и результатов моделирования, подходы к валидации численных моделей.

Настоящий стандарт разработан с целью обеспечения единого подхода к моделированию низкоскоростных ударных процессов и является обязательным при подтверждении адекватности результатов моделирования реальному поведению описываемых объектов.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использована нормативная ссылка на следующий стандарт:
ГОСТ Р 57188 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения

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.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины и определения согласно ГОСТ Р 57188.

Издание официальное

4 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ПО — программное обеспечение;
КМ — компьютерное моделирование;
БЭ — базовый эксперимент;
МАВЭ — материальный валидационный эксперимент;
МОВЭ — модельный валидационный эксперимент;
ВЭД — вторичные экспериментальные данные;
ИО — испытательное оборудование;
КПО — конструктивно подобный образец;
МПМ — модель поведения материала;
НДС — напряженно-деформированное состояние;
ОМ — объект моделирования;
ПЭД — первичные экспериментальные данные;
СИ — средства измерения;
ЧРМ — численная расчетная модель;
ЭУ — экспериментальные установки.

5 Требования к моделям поведения материалов при низкоскоростном ударном нагружении

5.1 Модель поведения материала при низкоскоростном ударном нагружении должна адекватно описывать поведение материала при ударном нагружении в возможно более широком диапазоне значений деформаций, температур и иных существенных параметров процесса. При применении МПМ как элемента ЧРМ должен указываться диапазон значений параметров, в котором допускается применение данной МПМ.

5.2 Для описания поведения материалов в условиях низкоскоростного ударного нагружения могут выбираться квазистатические определяющие соотношения и критерии разрушения, в которых не учитывается зависимость параметров от скорости деформации.

5.3 МПМ должна допускать свою верификацию на основании результатов статических и/или копровых ударных экспериментов.

5.4 Параметры МПМ определяются на основании результатов БЭ.

5.5 Данные, получаемые из БЭ, должны быть физически обоснованными и достаточными для определения параметров МПМ в возможно более широком диапазоне температур, видов НДС и иных существенных параметров процесса.

5.6 ПЭД должны быть воспроизводимы в рамках БЭ с заранее определенной точностью, учитывающей разброс определяемых характеристик и погрешности измерений.

6 Требования к процедуре валидации моделей поведения материалов при низкоскоростном ударном нагружении

6.1 Основным документом, содержащим данные о валидации (валидируемости) МПМ при низкоскоростном ударе, является отчет о валидации МПМ.

6.2 Отчет о валидации МПМ должен содержать сведения, подтверждающие способность МПМ моделировать поведение материала при низкоскоростных ударах, а также сведения о точности моделирования и погрешностях рассчитываемых параметров.

6.3 Отчет о валидации МПМ должен содержать следующие разделы:

- Объект валидации;
- Матрица валидации;
- Описание МАВЭ;
- Результаты валидации МПМ;
- Описание экспериментальных установок и представление экспериментальных данных;
- Перечень источников.

6.4 Раздел «Объект валидации» должен содержать описание верифицируемой МПМ, а также необходимые нормативные ссылки и ссылки на литературные источники, содержавшие математическое обоснование модели, либо теоретические выкладки с таким обоснованием.

6.5 Раздел «Матрица валидации» содержит для каждого моделируемого материала информацию об областях, для которых проведена валидация МПМ.

6.5.1 В матрице валидации указывается перечень МАВЭ с указанием погрешности получения ПЭД и ВЭД, используемых для валидации МПМ, а также значения параметров, характеризующих МАВЭ.

6.5.2 Рекомендуемая структура матрицы валидации МПМ приведена в приложении А.

6.5.3 В процессе валидации МПМ при низкоскоростном ударе в рамках настоящего стандарта в качестве МАВЭ рекомендуется использовать испытания на статическое нагружение при различных параметрах приложения нагрузок, а также различные виды копровых испытаний [1].

6.5.4 В разделе также приводится обоснование достаточности информации, подтверждающей адекватность полученных с применением МПМ расчетных значений параметров и их погрешностей в заявленной области применения МПМ.

6.6 Раздел «Описание МАВЭ» должен содержать полный перечень и краткое описание экспериментов, использованных для обоснования МПМ. Должны быть приведены ссылки на общедоступные источники информации с подробным описанием выбранных МАВЭ.

6.6.1 Также в разделе для каждого ВРЖ указываются сведения о погрешностях определения параметров для выбранных МАВЭ.

6.7 В разделе «Результаты валидации МПМ» приводится оценка сравнения результатов расчетов, проведенных на основании верифицируемой МПМ, и результатов МАВЭ. Для различных областей указывается уровень соответствия результатов моделирования и результатов МАВЭ. Результаты оценки должны быть ясно изложены и содержать обоснование достоверности и корректности сравнения. Также в разделе приводится обоснование необходимости и достаточности проведенного сравнения. Дается количественная оценка расхождения результатов МАВЭ и МПМ, приводится погрешность расчетных параметров в заявленных областях.

6.8 В разделе «Описание экспериментальных установок и представление экспериментальных данных» указывается место нахождения, наименование, инвентарный номер и другие сведения, позволяющие однозначно идентифицировать оборудование. Также приводят технические характеристики оборудования, сведения о поверке/калибровке, изображения, чертежи или фотографии оборудования. Отдельно приводят описания и характеристики средств регистрации, формата регистрируемых данных и методов их обработки, а также сведения о погрешности экспериментальных данных.

6.9 В разделе «Перечень источников» приводят библиографический список источников, использованных при составлении отчета о валидации МПМ.

7 Требования к численной расчетной модели и результатам численного моделирования

Валидация решения задачи численного моделирования низкоскоростных ударов осуществляется при обеспечении выполнения следующих требований к результатам моделирования.

7.1 Результаты численного моделирования низкоскоростного удара должны допускать сравнение по некоторым параметрам процесса с данными, которые могут быть получены при проведении МОВЭ и/или ВЭ.

7.2 Получаемые в результате численного моделирования параметры процесса ударного взаимодействия, а также временные масштабы изменения значений этих параметров должны быть реализуемы в рамках проведения МОВЭ и/или ВЭ.

7.3 ЧРМ должна обеспечивать возможность синхронизации во времени результатов численного моделирования с результатами МОВЭ и/или ВЭ, а также адекватно воспроизводить начальные и граничные условия, реализуемые при проведении МОВЭ и/или ВЭ.

7.4 Процедура валидации ЧРМ осуществляется на основе полученного численного решения ЧРМ, представленного в виде пояснительной записки к расчету, и набора файлов с электронными (числовыми) данными, содержащими результаты расчета.

7.5 Пояснительная записка к расчету должна содержать следующие разделы:

- Титульный лист;
- Введение;

- Цели и задачи моделирования;
- Описание ЧРМ;
- Описание формата регистрируемых данных;
- Таблица регистрируемых данных.

7.6 На титульном листе указывают:
- название расчета;
- полное наименование организации, проводившей расчеты;
- время и место проведения расчетов.

7.7 В разделе «Введение» должны быть приведены:
- название расчета;
- полное наименование организации, проводившей расчеты;
- время и место проведения расчетов;
- полное наименование организации, разработавшей ЧРМ;
- информация о ПО КМ и аппаратных средствах (АС), использовавшихся для расчета.

7.8 В разделе «Цели и задачи моделирования» должны быть приведены:
- цель проведения расчетов;
- задачи, на решение которых направлено моделирование.

7.9 В разделе «Описание ЧРМ» должны быть приведены:
- информация об объектах моделирования;
- описание алгоритма расчета;
- описание математической модели;
- описание численного метода;
- описание области расчета и ее дискретизации;
- описание начальных и граничных условий;
- описание МПМ, применяемых в ЧРМ.

7.10 В разделе «Описание формата регистрируемых данных» должны быть приведены:
- вид данных (двоичный, тестовый);
- структура данных;
- иная информация, необходимая для обработки данных.

7.11 В разделе «Таблица регистрируемых данных» приводится следующая информация:
- тип регистрируемых данных;
- момент времени, в который зарегистрированы данные;
- перечень элементов дискретизации (объекты, сегменты, точки, узлы/элементы пространственной дискретизации), в которых зарегистрированы данные, с указанием номеров, диапазонов номеров или иных данных, позволяющих однозначно идентифицировать эти элементы;
- название, размер и формат файла, содержащего данные;
- прочая информация, позволяющая однозначно определить расположение данных и получить их значения.

7.12 Данные, регистрируемые в процессе моделирования, должны содержать, но не ограничиваться, следующие значения:
- для расчета в целом:
  - а) начальный шаг интегрирования по времени;
  - б) начальные значения кинетической, внутренней и полной энергии системы;
- в заданные моменты времени для всей модели:
  - а) текущее значение времени;
  - б) текущее значение шага интегрирования;
  - в) текущие значения кинетической, внутренней и полной энергии системы;
- для каждого объекта в модели:
  - а) начальные и конечные значения кинетической, внутренней и полной энергии объекта;
  - б) начальные и конечные значения координат, скорости и ускорения центра масс объекта;
- в заданные моменты времени для заданных объектов в модели:
  - а) текущие значения кинетической, внутренней и полной энергии объекта;
  - б) текущие значения координат, скорости и ускорения центра масс объекта;
  - в) текущие значения перемещения, скорости и ускорения объекта как жесткого целого;

- в заданные моменты времени для заданных элементов (точек, узлов и/или конечных элементов) пространственной дискретизации математической модели:

а) текущие координаты элемента;

б) шаг интегрирования в элементе;

в) текущие значения перемещений;

г) текущие значения скоростей;

д) текущие значения ускорений;

е) текущие значения деформаций в глобальной системе координат;

ж) текущие значения напряжений в глобальной системе координат;

и) текущие значения температуры в элементе;

к) текущие значения термодинамических параметров в элементе;

л) текущие значения, характеризующие поврежденное состояние среды (при наличии в модели);

м) статус элемента (в случае использования алгоритмов удаления элементов).

8 Требования к процедуре валидации численной расчетной модели

8.1 Основным документом, подтверждающим возможность использования той или иной ЧРМ для моделирования поведения КПО при низкоскоростном ударе с заявленной точностью, является отчет о валидации ЧРМ.

8.2 Отчет о валидации ЧРМ должен содержать следующие разделы:

- Введение;
- Описание объекта валидации;
- Матрица валидации;
- Описание валидационных расчетов с использованием ЧРМ;
- Описание методик проведения МОВЭ, экспериментальных установок и представление экспериментальных данных;
- Результаты валидации ЧРМ;
- Перечень источников.

8.3 В разделе «Введение» приводятся общие сведения о назначении ЧРМ и информация об организации, подготовившей отчет.

8.4 В разделе «Описание объекта валидации» содержится описание ЧРМ, область ее применения, обосновывается выбор ЧРМ в качестве инструмента моделирования процессов в данной области.

8.5 В разделе «Матрица валидации» для каждого моделируемого объекта и/или его элемента приводится информация об областях, для которых проведена валидация ЧРМ. В матрице валидации указываются виды воздействия на объект (и/или его элемент) и/или состояние объекта, которые ЧРМ моделирует. Также приводятся подлежащие проверке физические явления и/или процессы, происходящие при приведенных в матрице валидации режимах, состояниях объекта (и/или его элемента) и/или видах воздействия на объект, а также перечень МОВЭ, служащих для проверки ЧРМ, в которых воспроизведены приведенные в матрице валидации виды воздействия на объект (и/или его элемент) и/или состояние объекта, экспериментальные установки (ЭУ) или испытательное оборудование (ИО), на которых проводятся МОВЭ. Рекомендуемая структура матрицы валидации ЧРМ приведена в приложении Б.

8.5.1 В разделе также должно быть приведено подробное описание физических явлений и/или процессов и/или видов воздействия, включенных в матрицу валидации, а также обоснование достаточности информации, включенной в матрицу валидации ЧРМ, для подтверждения адекватности полученных с применением ЧРМ расчетных значений параметров и их погрешностей в заявленном диапазоне применения ЧРМ.

8.6 Раздел «Описание валидационных расчетов с использованием ЧРМ» должен содержать полный перечень и краткое описание моделируемых МОВЭ, использованных для обоснования ЧРМ, указаны диапазоны и погрешности сопоставляемых расчетных параметров. Должны быть приведены ссылки на общедоступные источники информации с подробным описанием выбранных МОВЭ.

8.7 Раздел «Описание методик проведения МОВЭ, экспериментальных установок и представление экспериментальных данных» должен включать описание ЭУ (ИО) и экспериментальных данных, используемых для валидации ЧРМ. Описание ЭУ (ИО), выполненных на ней экспериментов или ис-

пытаний, а также результаты валидации ЧРМ по этим экспериментам или испытаниям допускается приводить в одном разделе.

8.7.1 Для несертифицированных ЭУ (ИО) в разделе приводится их описание. В описании ЭУ (ИО) приводятся:

- принципиальная схема, обеспечивающая понимание сути эксперимента, испытания, явления и т. п., с указанием, какие явления, процессы и/или элементы оборудования моделируются на ЭУ (ИО) и как;
- схема измерений, содержащая сведения о числе, расположении, погрешности, динамических характеристиках и частоте опроса измерительных датчиков, а также сведения о погрешности вторичной измерительной аппаратуры;
- перечень и диапазоны измеряемых параметров, полные погрешности их измерения и сведения о метрологической аттестации системы измерений на ЭУ (ИО);
- сведения о представительности экспериментальных данных со ссылкой на литературные источники, где приведено обоснование достаточности числа проведенных опытов для получения достоверных экспериментальных зависимостей.

8.7.2 Если для валидации ЧРМ не использованы экспериментальные данные, этому факту должно быть дано соответствующее обоснование, то есть показано, что экспериментального обоснования не требуется (например, ЧРМ реализует аналитическое решение, экспериментов не существует по объективным причинам, которые должны быть приведены, и т. д.).

8.8 В разделе «Результаты валидации ЧРМ» приводятся оценка сравнения результатов расчетов, выполненных с помощью зафиксированной версии ЧРМ с данных МОВЭ. Для различных областей указывается уровень соответствия результатов моделирования с применением ЧРМ и результатов МАВЭ. Результаты оценки должны быть ясно изложены и содержать обоснование достоверности и корректности сравнения. Также в разделе приводится обоснование необходимости и достаточности проведенного сравнения. Должны быть приведены результаты статистического анализа сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей, дана количественная оценка расхождения экспериментальных и расчетных данных, приведена погрешность расчетных параметров в заявленной области состояний объекта, приведены доказательства применимости ЧРМ для моделирования объекта (и/или его элемента).

8.8.1 Для ЧРМ, используемой для расчетов в обоснование работоспособности объекта, должна быть указана и обоснована степень выполнения законов сохранения в случае их применимости. Для ЧРМ, предназначенной для проектных и/или эксплуатационных расчетов, должны быть указаны погрешности определения расчетных параметров.

8.9 В разделе «Перечень источников» должен быть представлен перечень имеющих официальные выходные данные документов (опубликованные материалы, отчеты организаций, официально зарегистрированные протоколы, проектная, конструкторская и эксплуатационная документация, сертификаты и т. п.), использованных для обоснования ЧРМ, в том числе требуемых для формирования блока исходных данных и выполнения расчетов.

8.10 В приложении к отчету о валидации ЧРМ могут быть представлены дополнительные материалы, необходимые для обеспечения полноты информации, приведенной в отчете о валидации ЧРМ.

8.11 Допускается включение в отчет о валидации ЧРМ дополнительной информации, являющейся, по мнению заявителя ЧРМ, существенной для обоснования применимости ЧРМ для моделирования низкоскоростных ударов.

Приложение А
(рекомендуемое)

Структура матрицы валидации модели поведения материала при низкоскоростном ударе

Наименование модели:
Типы МАВЭ: (перечисление)
Типы ПЭД: (для каждого МАВЭ, перечисление, краткая характеристика)
Типы ВЭД: (для каждого МАВЭ, перечисление, процедура вычисления)

Таблица А.1

Название теста	Диапазоны значений данных						
	ПЭД 1			ВЭД 1			...
	Диапазон 1 (погрешность)	Диапазон 2 (погрешность)	...	Диапазон 1 (погрешность)	Диапазон 2 (погрешность)	...	
МАВЭ № 1 (наименование, параметры МАВЭ)							
МАВЭ № 2							

Примечание — Символ «...» означает «и так далее».

В ячейках матрицы значком «+» или «–» указывается на выполнение или отсутствие тестов, а также величина максимального расхождения результатов расчетов с тестом.

Приложение Б
(рекомендуемое)

Структура матрицы валидации численной расчетной модели низкоскоростного удара

Название ЧРМ:
Название объекта валидации:
Виды МОВЭ: (перечисление, описание, ЭУ и ИО)
Виды воздействия: (перечисление, описание)
Проверяемые величины: (перечисление, описание)

Таблица Б.1

Виды воздействия и/или состояние объекта	МОВЭ (название, параметры)	Подлежащие проверке явления						
		Явление 1			Процесс 1			...
		Характеристика 1	Характеристика 2	...	Параметр 1	Параметр 2	...	...
Вид воздействия 1								
Состояние 1								

Примечание — Символ «...» означает «и так далее».

В таблице должно быть указано для каждого проверяемого явления или процесса:
1) «+» — результаты ЧРМ соответствуют МОВЭ;
2) 0 — частично соответствуют;
3) «–» — не соответствуют;
4) « » — не установлено.

Библиография

[1] Жерноклетов М.В. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках. — Саров, 2003. — 403 с.

УДК 519.642.2:006.354 ОКС 35.020

Ключевые слова: моделирование, численное моделирование, физические процессы, низкоскоростные удары, внедрения, верификация, валидация

БЗ 1—2018/88

Редактор *Н.А. Аргунова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *Е.Р. Ароян*
Компьютерная верстка *Л.В. Софейчук*

Сдано в набор 07.02.2018. Подписано в печать 06.03.2018. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,26. Тираж 22 экз. Зак. 405.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандартов

ИД «Юриспруденция», 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 11.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru
Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123001, Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru