ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 57700.41— 2024

Компьютерные модели и моделирование

ВЕРИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Определение напряженно-деформированного состояния конструкций в упругопластической области

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. № 23-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

Введение

В настоящее время широко используется компьютерное моделирование для определения напряженно-деформированного состояния конструкций и их элементов при их расчетном обосновании на этапах проектирования, проведения испытаний, производства и эксплуатации. Под определением напряженно-деформированного состояния понимается определение количественных характеристик компонент деформаций и напряжений, а также определенных на их основе интегральных показателей.

Для решения задач механики сплошной среды наибольшее распространение получили численные сеточные методы. Основной идеей численных сеточных методов является сведение математической задачи к конечномерной через дискретизацию исходной задачи, то есть переходом от функций непрерывного аргумента к функциям дискретного аргумента. Таким образом, исходную задачу заменяют другой задачей, аппроксимирующей исходную и определенной в узлах сетки области моделирования. При численном решении аппроксимирующей задачи всегда получается не точное решение исходной задачи, а некоторое приближенное решение.

В механике сплошной среды среди сеточных методов для определения напряженно-деформированного состояния широкое распространение получили конечно-разностные методы, методы конечных элементов, методы граничных элементов.

Поведение элементов конструкций в зависимости от условий нагружения и свойств материалов может быть как линейным, так и нелинейным. Одним из широко распространенных типов нелинейного поведения материала является пластичность, то есть способность твердых тел деформироваться под действием приложенных к нему внешних сил и получать остаточные (пластические) деформации при снятии нагрузки.

Точность определения напряженно-деформированного состояния конструкций и их элементов в упругопластической области зависит от степени соответствия компьютерной реализации модели ее исходной математической модели.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Компьютерные модели и моделирование

ВЕРИФИКАЦИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Определение напряженно-деформированного состояния конструкций в упругопластической области

Computer models and simulation. Verification and validation of computer models.
Determination of the stress-strain state of structures in the elastic-plastic region

Дата введения — 2024—06—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает общие требования к верификации компьютерных моделей (КМ), применяемых для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций в упругопластической области, с использованием программного обеспечения компьютерного моделирования (ПО КМ), реализующего на основе сеточных методов компьютерное моделирование физических процессов механики сплошной среды.

Стандарт также устанавливает требования к порядку выполнения, составу и содержанию отчета по верификации КМ.

На основе настоящего стандарта допускается, при необходимости, разрабатывать стандарты на верификацию компьютерных моделей, которые учитывают особенности упругопластического деформирования конструкций конкретных видов изделий в зависимости от их специфики.

2 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

2.1

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

[ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.4]

2.2 **верификационный базис;** ВБ: Упорядоченная система данных, содержащая объекты сеточных данных, параметры контроля корректности компьютерной модели (КМ), методики определения параметров контроля КМ, критерии корректности КМ и результаты компьютерного моделирования, которые позволяют доказать с заданной точностью соответствие компьютерной реализации модели ее исходной математической модели.

2.3 **верификация компьютерной модели (контроль корректности):** Совокупность действий с моделью, результатом которых является подтверждение соответствия компьютерной реализации модели ее исходной математической или информационной модели.

Издание официальное

2.4

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

[ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.3]

2.5

граничные условия: Условия, накладываемые на рассчитываемые искомые величины на границах расчетной области.

[ГОСТ Р 57188—2016, пункт 2.2.6]

2.6 **интенсивность напряжений:** Обобщенное напряжение в точке тела при сложном НДС, эквивалентное напряжению при простом растяжении по условию перехода тела в пластическое состояние в этой точке.

2.7 **компьютерная модель (электронная модель):** Модель, выполненная в компьютерной (вычислительной) среде и представляющая собой совокупность данных и программного кода, необходимого для работы с данными.

2.8 **критерий корректности компьютерной модели:** Условие, выполнение которого свидетельствует о корректности КМ.

2.9

математическая модель: Модель, в которой сведения об объекте моделирования представлены в виде математических символов и выражений.

[ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.1.2]

2.10 **напряженно-деформированное состояние:** Совокупность количественных характеристик деформаций и напряжений, а также определенных на их основе интегральных показателей (например, эквивалентных напряжений по различным гипотезам прочности, коэффициентов трехосности) в фиксируемый момент времени, возникающих при действии на конструкцию внешних нагрузок, температурных полей и других факторов.

2.11 **нагрузки:** Физические воздействия, вызывающие изменение НДС в конструкции.

2.12

начальные условия: Условия на рассчитываемые искомые величины внутри расчетной области на начальный момент времени моделирования.

[ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.2.7]

2.13

область моделирования (расчетная область): Прообраз области действительного физического пространства, в котором вводится определенная система координат для описания точек области набором вещественных чисел, называемых координатами точек пространства. Предполагается, что область моделирования или часть ее подобластей заполнены сплошной средой, описываемой определенной замкнутой системой уравнений.

[ГОСТ Р 57700.14—2018, пункт 3.3]

2.14

объект моделирования: Явление, объект или свойство объекта реального мира.

[ГОСТ Р 57412—2017, пункт 3.1.2]

2.15 **объект сеточных данных:** Идентифицированная (именованная) совокупность сеточных элементов и/или узлов, а также объектов, определяемых по характеристикам других объектов и отобранных с какой-либо целью или по какому-либо признаку (совокупности признаков).

2.16 **параметры контроля корректности компьютерной модели:** Специально выбранные для контроля корректности КМ параметры, зависящие от расчета КМ.

Примечание — В большинстве случаев точное решение задачи является неизвестным, и поэтому непосредственная оценка корректности решения задачи затруднительна. Как правило, о корректности решения судят по поведению параметров, контролирующих корректность КМ. На практике в качестве параметров контроля могут приниматься разнообразные локальные и интегральные параметры, связанные с областью применения КМ.

2.17 **перемещение:** Отклонения точек материального тела, характеризующие изменение положения материального тела относительно исходных координат.

2.18

пластическая деформация: Деформация, не исчезающая после снятия вызвавшей ее нагрузки.

[ГОСТ Р 57173—2016, пункт 3.2]

2.19

программное обеспечение компьютерного моделирования: Программы, выполняющие математические расчеты, и программы, предназначенные для подготовки исходных данных, обработки результатов расчета, а также другие вспомогательные программы.

[ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.1]

2.20 **разработчик:** Юридическое или физическое лицо, осуществляющее верификацию компьютерной модели.

2.21 **расчет компьютерной модели:** Процесс компьютерного моделирования с использованием подготовленной КМ и соответствующего ПО КМ.

Примечание — Завершается выдачей результатов компьютерного моделирования.

2.22 **расчетная сетка:** Сплошное покрытие области моделирования элементами достаточно простой геометрической формы и конечных размеров, соединенных между собой в вершинах (узлах).

2.23

решатель ПО КМ: Программный модуль ПО КМ, реализующий одним численным методом решение математических уравнений, соответствующих одной концептуальной модели явления.

[ГОСТ Р 57700.10—2018, пункт 3.26]

2.24

сертификация ПО КМ: Регламентированная процедура признания возможности использования ПО КМ в заявленной области/границах применения, завершающаяся выдачей сертификата.

[ГОСТ Р 57700.2—2017, пункт 3.1.2]

2.25

сеточные методы: Численные методы решения дифференциальных/интегральных уравнений, основанные на замене исходных уравнений уравнениями от дискретного аргумента при помощи аппроксимации уравнений или искомых функций на сетке.

[ГОСТ Р 57700.14—2018, пункт 3.10]

2.26 **сеточный узел (узел сетки):** Точка в области моделирования, в которой определена аппроксимация уравнений математической модели.

2.27 **сеточный элемент (элемент сетки):** Элемент достаточно простой геометрической формы и конечных размеров, на которые разбивается область моделирования.

Примечание — В общем случае идентификация отдельных сеточных элементов определяется заданным множеством узлов.

2.28 **упругопластическая область:** Область реализации внешних и внутренних воздействий, в которой возникающие в каждой точке конструкции напряжения и деформации определяются в предположении упругопластического поведения материала на основе теории упругости и теории пластичности.

2.29 **формоизменение конструкции:** Изменение геометрических параметров конструкции по результатам расчета КМ.

3 Общие требования

3.1 В результате проведения верификации КМ, путем контроля корректности КМ определяется, насколько компьютерная реализация модели соответствует ее исходной математической модели.

3.2 Верификация КМ осуществляется в три этапа:

- формирование верификационного базиса КМ;
- расчет КМ;
- исследование корректности КМ.

3.3 На первом этапе верификации формируется ВБ КМ в соответствии с положениями настоящего стандарта.

3.4 На втором этапе верификации выполняют расчет КМ с соответствующим ПО КМ, реализующим на основе сеточного метода компьютерное моделирование физических процессов механики сплошной среды.

3.4.1 Верификацию и валидацию ПО КМ, используемого при расчете КМ, а также при необходимости сертификации ПО КМ выполняют в соответствии с нормативно-техническими документами, указанными в техническом задании.

3.4.2 Результаты второго этапа верификации представляют собой набор файлов с результатами моделирования в виде электронных (числовых, текстовых) данных ПО КМ.

3.5 Результаты третьего этапа верификации оформляют в виде отчета о верификации КМ в соответствии с требованиями настоящего стандарта.

3.6 Результаты верификации КМ позволяют сделать выводы о корректности компьютерной реализации модели только для случая данной КМ и ее ВБ. При изменении КМ должна быть проведена повторная верификация КМ.

4 Порядок выполнения

4.1 На первом этапе верификации КМ разработчик по согласованию с заказчиком формирует ВБ КМ.

4.2 ВБ КМ должен содержать перечень элементов в виде определения объекта сеточных данных и связанных с ним параметров контроля корректности КМ, которые являются существенными для целей и задач верификации КМ.

4.3 В качестве объекта сеточных данных элемента ВБ КМ могут быть определены:

- все узлы сетки;
- все элементы сетки;
- конкретный набор идентифицируемых узлов и/или элементов;
- объекты, определяемые по характеристикам других объектов сеточных данных (например, по центру масс сетки).

4.4 Разработчик выбирает параметры контроля корректности КМ в соответствии с областью применения КМ и спецификации используемого ПО КМ.

4.5 Для каждого элемента в ВБ КМ разработчик определяет:

а) методику определения значений параметров корректности КМ;

б) критерии корректности КМ.

4.6 Методики определения значений параметров корректности КМ разрабатываются в соответствии с областью применения КМ и спецификацией соответствующего ПО КМ.

4.7 Критерии корректности КМ разрабатывают и обосновывают в соответствии с областью применения КМ и спецификацией соответствующего ПО КМ.

4.8 ВБ КМ должен включать следующие элементы:

а) объект сеточных данных — все узлы/элементы сетки; параметры контроля корректности КМ — параметры, характеризующие соблюдение законов сохранения при расчете КМ в соответствующем ПО КМ; методику определения значений параметров корректности КМ, характеризующих соблюдение законов сохранения при расчете КМ; критерии корректности КМ определяет разработчик в соответствии со спецификацией соответствующего ПО КМ.

Примеры

1 Объект сеточных данных — все узлы/элементы сетки; параметры контроля решения — суммарные значения кинетической, внутренней и полной энергии для всей конструкции.

2 Объект сеточных данных — все узлы сетки; параметры контроля решения — результирующие силы и моменты реакций, результирующие силы и моменты приложенной нагрузки.

3 Объект сеточных данных — все узлы сетки; параметры контроля решения — масса сетки;

б) объект сеточных данных — все узлы сетки; параметры контроля решения — норма вектора перемещений;

в) объект сеточных данных — все элементы сетки; параметры контроля решения — интенсивность напряжений;

г) объект сеточных данных — все элементы сетки; параметры контроля решения — скалярный параметр, характеризующий пластическую деформацию в соответствующем ПО КМ.

4.9 В ВБ КМ дополнительно включают элементы, являющиеся, по мнению разработчика, необходимыми для проведения верификации КМ.

4.10 На втором этапе верификации КМ разработчик проводит расчет КМ с сохранением в файлы всех результатов расчета, которые необходимы для проведения верификации с формированным ВБ КМ.

4.10.1 Допускается использование вспомогательного ПО для преобразования данных из файлов результатов моделирования в соответствующем ПО КМ в файлы с форматами данных, необходимых для методик определения значений параметров корректности решения КМ.

4.11 На третьем этапе разработчик проводит исследование корректности КМ.

Третий этап верификации КМ должен включать в себя следующие мероприятия:

- проверку соблюдения законов сохранения при расчете КМ;
- проверку соответствия формоизменения конструкции и поля нормы вектора перемещений схеме приложенных к КМ нагрузок и граничных условий;
- оценку местоположения в КМ объектов сеточных данных, где реализуются экстремумы значений интенсивности напряжений;
- оценку местоположения в КМ объектов сеточных данных, где реализуются экстремумы значений параметра, характеризующего пластическую деформацию;
- оценку неоднородности поля интенсивности напряжений;
- оценку неоднородности поля параметра, характеризующего пластическую деформацию;
- оценку и проверку для определения выполнения критериев корректности КМ для всех элементов ВБ КМ.

4.12 Методика проверки соблюдения законов сохранения при расчете КМ заключается в проверке выполнения критериев корректности КМ над соответствующими параметрами контроля корректности КМ и объектами сеточных данных из ВБ КМ по методикам определения значений параметров корректности КМ из ВБ КМ.

4.13 Методика проверки соответствия формоизменения конструкции и поля нормы вектора перемещений схеме приложенных к КМ нагрузок и граничных условий заключается:

- в идентификации и квалификации несоответствий схеме приложенных к КМ нагрузок и граничных условий;
- в определении наличия неоднородности и разрывов в поле нормы вектора перемещений.

4.14 Методика оценки местоположения в КМ объектов сеточных данных, где реализуются экстремумы интенсивности напряжений, заключается в идентификации и квалификации найденных объектов. Далее проводят оценку соответствия местоположения, найденных объектов сеточных данных со схемой приложенных к КМ нагрузок и граничных условий.

4.15 Методика оценки местоположения в КМ объектов сеточных данных, где реализуются экстремумы параметра, характеризующего пластическую деформацию, заключается в идентификации и квалификации найденных объектов. Далее проводят оценку соответствия местоположения найденных объектов сеточных данных со схемой приложенных к КМ нагрузок и граничных условий.

4.16 Оценку неоднородности поля интенсивности напряжений рекомендуется проводить по методике, приведенной в приложении А.

4.17 Оценку неоднородности поля параметра, характеризующего пластическую деформацию, рекомендуется проводить по методике, приведенной в приложении А, заменив в формулах интенсивность напряжений в ячейке на параметр, характеризующий пластическую деформацию.

4.18 Оценку и проверку для определения выполнения критериев корректности КМ проводят для всех элементов из ВБ КМ согласно определениям критериев корректности КМ из ВБ КМ.

4.19 Допускается использование методики оценки неоднородности поля интенсивности напряжений, приведенной в приложении А для оценки неоднородности любых параметров корректности КМ, заменив в формулах интенсивность напряжений в ячейке на требуемый параметр корректности КМ.

4.20 Допускается использование методик исследования корректности КМ с отклонениями от рекомендованных, но только в тех случаях, когда это отклонение оформлено документально, технически обосновано, утверждено и принято заказчиком.

4.21 В качестве критерия успешной верификации КМ устанавливается условие успешного выполнения всех критериев корректности КМ элементов ВБ КМ.

5 Требования к составу и содержанию отчета по верификации КМ для определения НДС в упругопластической области

5.1 Результаты верификации КМ оформляют в виде отчета. Допускается включение отчета о верификации КМ в любой другой отчет, связанный с КМ, в качестве раздела или подраздела отчета.

5.2 Состав и содержание отчета о верификации должны соответствовать требованиям настоящего стандарта.

5.3 Отчет о верификации КМ для определения НДС в упругопластической области должен содержать следующие разделы:

- введение;
- объект моделирования;
- программное обеспечение компьютерного моделирования;
- постановка задачи моделирования;
- верификационный базис;
- результаты верификации компьютерной модели;
- заключение;
- перечень источников.

5.4 В разделе «Введение» должны быть приведены:

- общие сведения об объекте моделирования и области применения КМ;
- цель проведения верификации КМ;
- задачи, на решение которых направлена верификация КМ.

5.5 В разделе «Объект моделирования» должно быть приведено краткое, но достаточное для понимания описание конструкции (графически или схематично представлена геометрия конструкции, описаны элементы конструкции, важные для целей и задач верификации КМ) со ссылками на источники информации, где это описание приведено подробно.

5.6 В разделе «Программное обеспечение компьютерного моделирования» должны быть приведены:

- номер версии ПО КМ, использованного для расчета КМ;
- официальные выходные данные документов, подтверждающие прохождение верификации, валидации, сертификации ПО КМ, если в техническом задании заданы требования к верификации, валидации, сертификации ПО КМ;
- краткое, но достаточное для понимания описание основных характеристик ПО КМ, со ссылками на источники информации, где это описание приведено подробно;
- описание форматов файлов с результатами моделирования для прохождения верификации КМ;
- описание вспомогательного ПО для преобразования данных из файлов результатов моделирования в соответствующем ПО КМ в файлы с форматами данных, необходимых для методик определения значений параметров корректности решения КМ, если такое было использовано при верификации КМ.

5.7 В разделе «Постановка задачи моделирования» должно быть приведено описание верифицируемой КМ. Для этого должно быть приведено:

- описание разбиения области моделирования на сеточные элементы;
- описание схемы приложения нагрузок, граничных и начальных условий;
- описание использованных настроек решателя ПО КМ для расчета КМ.

5.8 В разделе «Верификационный базис» должно быть приведено описание элементов ВБ КМ. Для этого должно быть приведено:

- описание объектов сеточных данных;
- описание параметров контроля корректности КМ;

- описание методик определения значений параметров корректности КМ;
- описание и обоснование критериев корректности КМ;
- описание использованных способов определения усредненной интенсивности напряжений;
- описание и обоснование методик исследования корректности КМ с отклонениями от рекомендованных, если такие были использованы при верификации КМ.

5.9 В разделе «Результаты верификации компьютерной модели» должны быть приведены результаты верификации КМ.

5.9.1 В качестве результатов верификации КМ приводят:

- результаты проверки соблюдения законов сохранения при расчете КМ. Следует указать все выявленные причины нарушения законов сохранения при расчете КМ и рекомендации к их устранению;
- результаты проверки соответствия формоизменения конструкции и поля нормы вектора перемещений со схемой приложенных к КМ нагрузок и граничных условий. Следует указать все выявленные причины несоответствия и/или наличия неоднородности и разрывов в поле нормы вектора перемещений и рекомендации к их устранению;
- результаты оценки месторасположения в КМ объектов сеточных данных, где реализуются экстремумы интенсивности напряжений. Следует привести оценку степени влияния значения интенсивности напряжений найденного объекта сеточных данных на точность результатов в целом;
- результаты оценки месторасположения в КМ объектов сеточных данных, где реализуются экстремумы параметра, характеризующего пластическую деформацию. Следует привести оценку степени влияния значения параметра, характеризующего пластическую деформацию найденного объекта сеточных данных, на точность результатов в целом;
- результаты оценки неоднородности поля интенсивности напряжений. Следует указать значения экстремумов неоднородности поля интенсивности напряжений для всей сетки КМ и для объектов сеточных данных из ВБ КМ по отдельности;
- результаты оценки неоднородности поля параметра, характеризующего пластическую деформацию. Следует указать значения экстремумов неоднородности поля параметра, характеризующего пластическую деформацию, для всей сетки КМ и для объектов сеточных данных из ВБ КМ по отдельности;
- результаты оценок и проверок для определения выполнения критериев корректности КМ для всех элементов ВБ КМ.

5.10 Раздел «Заключение» должен содержать общее заключение о верификации КМ, включающее:

- краткое описание особенностей объекта верификации;
- выводы о соблюдении законов сохранения при расчете КМ;
- выводы о соответствии формоизменения конструкции и поля нормы вектора перемещений схеме приложенных к КМ нагрузок и граничных условий;
- выводы о месторасположении в КМ объектов сеточных данных, где реализуются экстремумы интенсивности напряжений, и оценку степени их влияния на точность результатов в целом;
- выводы о месторасположении в КМ объектов сеточных данных, где реализуются экстремумы параметра, характеризующего пластическую деформацию, и оценку степени их влияния на точность результатов в целом;
- выводы о неоднородности поля интенсивности напряжений;
- выводы о неоднородности поля параметра, характеризующего пластическую деформацию;
- выводы о результатах оценок и проверок для определения выполнения критериев корректности КМ для всех элементов ВБ КМ;
- дополнительную информацию, которая является, по мнению разработчика, существенной для обоснования верификации КМ.

5.10.1 В зависимости от выявленных несоответствий должен быть приведен перечень требуемых изменений КМ. Каждое из предлагаемых изменений должно быть обосновано и детально описано.

5.10.2 В обоснованных случаях может быть выдано заключение об отказе от дальнейшего применения данной КМ при разработке изделия.

5.11 В разделе «Перечень источников» должен быть приведен библиографический список источников, использованных при составлении отчета о верификации КМ.

5.12 В приложении к отчету о верификации КМ могут быть представлены дополнительные материалы, необходимые для обеспечения полноты информации, приведенной в отчете.

5.13 Допускается включение в отчет о верификации КМ дополнительной информации, являющейся, по мнению разработчика, существенной для обоснования верификации КМ.

Приложение А
(рекомендуемое)

Методика оценки неоднородности поля интенсивности напряжений

А.1 Определяют усредненную интенсивность напряжений $\sigma_{VM,AVG}^{(i)}$ для каждого *i*-го узла сетки, по формуле

$$\sigma_{VM,AVG}^{(i)} = \sum_{j=1}^{N_{adj}^{(i)}} W^{(j,i)} \cdot \sigma_{VM}^{(j,i)}, \quad (A.1)$$

где $N_{adj}^{(i)}$ — количество сопряженных с *i*-м узлом сетки сеточных элементов;

j — порядковый номер сеточного элемента в перечне сопряженных сеточных элементов для *i*-го узла сетки;

$W^{(j,i)}$ — весовой множитель усреднения *j*-го сопряженного сеточного элемента для *i*-го узла сетки;

$\sigma_{VM}^{(j,i)}$ — значение интенсивности напряжений *j*-го сопряженного сеточного элемента для *i*-го узла сетки.

А.1.1 Для определения весового множителя усреднения применяют следующие выражения:

$$W^{(j,i)} = \frac{1}{N_{adj}^{(i)}}, \quad (A.2)$$

$$W^{(j,i)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_{adj}^{(i)}} V^{(j)}} \cdot V^{(j)}, \quad (A.3)$$

где $V^{(j)}$ — объем *j*-го сопряженного сеточного элемента.

А.1.2 Интенсивность напряжений *j*-го сопряженного сеточного элемента $\sigma_{VM}^{(j,i)}$ для *i*-го узла определяют следующим образом:

а) если решатель ПО КМ сохраняет результаты моделирования параметров НДС в центре сеточного элемента, то по компонентам тензора напряжений в центре сеточного элемента рассчитывают интенсивность напряжений в соответствии с определением для данного типа сеточного элемента, в результате полученное таким образом значение будет $\sigma_{VM}^{(j,i)}$;

б) если решатель ПО КМ сохраняет результаты моделирования параметров НДС в точках интегрирования сеточного элемента, то в точках интегрирования по соответствующим компонентам тензора напряжений рассчитывают интенсивность напряжений в соответствии с определением для данного типа сеточного элемента, далее проводят экстраполяцию полученных значений из точек интегрирования на узлы сеточного элемента, в результате полученное таким образом значение в *i*-м узле сетки от *j*-го сопряженного сеточного элемента будет $\sigma_{VM}^{(j,i)}$;

в) если решатель ПО КМ сохраняет результаты моделирования параметров НДС как экстраполированные значения из точек интегрирования сеточного элемента на узлы для каждого сеточного элемента, то по соответствующим компонентам тензора напряжений, отнесенных к *i*-му узлу *j*-го сопряженного сеточного элемента, рассчитывают интенсивность напряжений в соответствии с определением для данного типа сеточного элемента по компонентам, в результате полученное таким образом значение будет $\sigma_{VM}^{(j,i)}$.

А.2 Если решатель ПО КМ сохраняет результаты моделирования параметров НДС в центре сеточного элемента, то неоднородность напряжений каждого *j*-го сеточного элемента $\delta\sigma_{VM}^{(j)}$ определяют по формуле

$$\delta\sigma_{VM}^{(j)} = \left| \frac{\sigma_{VM}^{(j)} - \frac{1}{N^{(j)}} \cdot \sum_{k=1}^{N^{(j)}} \sigma_{VM,AVG}^{(k)}}{\sigma_{VM}^{(j)}} \right| \cdot 100\ \%, \quad (4)$$

где $\sigma_{VM}^{(j)}$ — интенсивность напряжений в центре *j*-го сеточного элемента, определяемая в соответствии с типом сеточного элемента по сохраненным решателем ПО КМ компонентам тензора напряжений в центре *j*-го сеточного элемента;

$N^{(j)}$ — количество узлов в *j*-м сеточном элементе;

$\sigma_{VM,AVG}^{(k)}$ — усредненная интенсивность напряжений для *k*-го узла *j*-го сеточного элемента, определенная по формуле (А.1).

А.3 Если решатель ПО КМ сохраняет результаты моделирования параметров НДС в точках интегрирования сеточного элемента или сохраняет результаты моделирования параметров НДС как экстраполированные значения из точек интегрирования сеточного элемента на узлы для каждого сеточного элемента, то неоднородность напряжений каждого *i*-го узла сетки $\delta\sigma_{VM}^{(i)}$ определяют по формуле

$$\delta\sigma_{VM}^{(i)} = \max\left(\left|\frac{\sigma_{VM,AVG}^{(i)} - \sigma_{VM}^{(j,i)}}{\sigma_{VM,AVG}^{(i)}}\right|\right)\cdot 100\ \%, \qquad (А.5)$$

где *j* — порядковый номер сеточного элемента в перечне сопряженных сеточных элементов для *i*-го узла сетки.

УДК 001.4:004:006.354

ОКС 35.080
35.240

Ключевые слова: программное обеспечение компьютерного моделирования, упругопластическое деформирование, напряженно-деформированное состояние, верификация, компьютерная модель, физико-механические процессы, отчет о верификации

Редактор *Е.В. Якубова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *И.А. Налейкиной*

Сдано в набор 19.01.2024. Подписано в печать 07.02.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,58.

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