ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 57700.10— 2018

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области

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. № 50-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

© 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 2
4 Обозначения и сокращения 4
5 Требования к подходу и организации проведения численного моделирования в упругой области НДС сложных элементов конструкций 4
6 Требования к порядку верификации и валидации расчетной модели для численного моделирования в упругой области НДС сложных элементов конструкций 7
Приложение А (рекомендуемое) Структура матрицы верификации и валидации расчетной модели для численного моделирования в упругой области НДС сложных элементов конструкций 9
Библиография 11

Введение

Численное моделирование все более широко используется для исследования процессов, происходящих в сложных элементах конструкций. Применение численных методов позволяет снизить затраты на экспериментальные исследования и доводку изделий, делая возможным более глубокий, чем раньше, анализ функционирования конструкции и позволяя рассмотреть большое количество вариантов реализации конструкции.

Благодаря совершенствованию вычислительной техники и информационных технологий расширяется использование технологий численного моделирования анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей и узлов.

Вместе с тем использование современных вычислительных технологий для расчета НДС сложных конструкций в упругой области может приводить к неправильным результатам при несоблюдении ряда требований к используемому программному обеспечению компьютерного моделирования (ПО КМ) НДС сложных конструкций.

Накопленный в настоящее время опыт применения ПО КМ для анализа в упругой области НДС сложных конструкций позволяет сформулировать общие требования к ПО КМ и постановке задачи численного моделирования, выполнение которых должно обеспечить достоверность получаемых решений, что и является целью настоящего стандарта.

Установленные в настоящем стандарте правила сформулированы для проверки применимости ПО КМ для исследования НДС сложных конструкций в упругой области, верификации и валидации моделей, и распространяются на задачи исследования НДС конструкций любой степени сложности, изготовленных из изотропных материалов с линейно-упругими свойствами, при статических нагрузках, и не распространяются на конструкции из материалов с нелинейно-упругим поведением, а также из анизотропных, композиционных и полимерных материалов.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области

Numerical modeling of physical processes. Determination of stress-strain state. Verification and validation of numerical models of complex structural elements in the elastic region

Дата введения — 2019—01—01

1 Область применения

Настоящий стандарт определяет требования к ПО КМ, используемому для исследования в упругой области НДС сложных элементов конструкций при разработке продукции и проведении приемочных, приемо-сдаточных, квалификационных, серийных и иных испытаний, а также на дальнейших этапах жизненного цикла продукции.

Настоящий стандарт применим в том числе при сертификации программного обеспечения для численного моделирования в упругой области НДС сложных элементов конструкций в составе специализированных программно-технических комплексов.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 2.052—2015 ЕСКД. Электронная модель изделия. Общие положения

ГОСТ Р 57188—2016 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 57700.2—2017 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения

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

Издание официальное

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **алгоритм:** Последовательность действий, необходимых для проведения численного моделирования.

3.2 **анализ результатов:** Любая последующая обработка или интерпретация отдельных результатов или наборов результатов, полученных при моделировании.

3.3 **геометрическая нелинейность:** Явление, при котором определение равновесного состояния конструкции осуществляется относительно ее деформированного состояния с учетом измененной вследствие этого состояния жесткости.

3.4 **геометрический элемент:** Идентифицированный (именованный) геометрический объект, используемый в наборе данных. Геометрическим объектом может быть точка, линия, плоскость, поверхность, геометрическая фигура, геометрическое тело.

3.5 **граничные условия;** ГУ: Условия, накладываемые на перемещения — кинематические ГУ; внешние нагрузки — давления, силы, моменты, точечные и распределенные, смешанные граничные условия.

Примечание — При применении МКЭ с формулировкой в перемещениях используются кинематические ГУ.

3.6

достоверность: Качество, характеризующее доверие или убежденность в результатах расчета и моделирования.

[СТО СИТИС-201-16А, статья 2.4.14]

3.7 **инженерная оценка:** Процесс дополнения, принятия или отклонения элементов расчета и/или другого инженерного анализа специалистом или группой специалистов на основании образования, опыта и признанной квалификации.

3.8 **конечно-элементная модель;** КЭМ (*сетка*): Совокупность элементов достаточно простой геометрической формы и конечных размеров, на которые сплошно разбита конструкция, для которой численно моделируется НДС [1].

3.9 **качество КЭМ:** Количественные оценки КЭМ, характеризующие как геометрическое совершенство элементов (априорные оценки до проведения численного моделирования), так и точность рассчитанного НДС (апостериорные оценки после проведения численного моделирования). Для данных оценок разработчиком ПО КМ по результатам валидации должны быть сформированы как предельно допустимые, так и недопустимые уровни величин, характеризующих качество КЭМ.

3.10 **квалификационный тест:** Некоторая задача, для которой имеется признанный какой-либо сертифицирующей организацией результат решения. Данную задачу, использующуюся при верификации и валидации программ математического моделирования, должен решить разработчик ПО КМ при сертификации. Решение этой задачи может быть как аналитическим или численным, так и представлять собой экспериментальный результат.

3.11

корректно поставленная задача: Задача определения решения по исходным данным, для которой выполнены следующие условия: 1) задача имеет решение при любых допустимых исходных данных; 2) каждым исходным данным соответствует только одно решение; 3) решение устойчиво.

[ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.2.15]

3.12 **критические зоны:** Зоны геометрической модели, которые соответствуют положению участков анализируемой конструкции с наименьшими запасами прочности (вычисление которых должно проводиться по имеющимся в отрасли нормирующим документам).

3.13

модель: Сущность, воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира.

[ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.1.1]

3.14

метод конечных элементов: Сеточный метод численного решения задач математической физики, в котором дискретизация исходных краевых задач производится на основе вариационных или проекционных методов при использовании специальных конечномерных подпространств функций, определяемых выбранной сеткой.

[ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.3.6]

3.15 **нагрузки:** Заданные силовые, кинематические и смешанные функции, действующие на модель, и обусловленные условиями работы.

3.16 **напряженно-деформированное состояние;** НДС: Множество действующих в каждой точке конструкции напряжений и деформаций в фиксируемый момент времени, возникающих из-за приложения к конструкции внешних воздействий (в том числе неравномерного поля температур).

3.17

некорректно поставленная задача: Задача, для которой не удовлетворяется хотя бы одно из условий, характеризующих корректно поставленную задачу.

[ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.2.16]

3.18

поверхностная модель: Трехмерная геометрическая модель изделия, представленная множеством ограниченных поверхностей, определяющих в пространстве форму изделия.

[ГОСТ 2.052—2015, статья 3.1.8]

3.19 **пользователь ПО КМ:** Инженер-расчетчик, проводящий численные исследования с применением ПО КМ.

3.20 **препроцессор и постпроцессор ПО КМ:** Программные модули ПО КМ, в которых осуществляются подготовка расчетной модели и анализ полученных результатов.

3.21 **программное обеспечение компьютерного моделирования (ПО КМ) в упругой области НДС конструкции:** Программы, выполняющие математические расчеты, и программы, предназначенные для подготовки исходных данных, обработки результатов расчета, и другие вспомогательные программы.

3.22 **размерность модели** (*геометрическая*): Уровень рассмотрения пространственных эффектов: 1D, 2D, 3D — одно-, двух- и трехмерная размерность соответственно.

3.23 **разработчик ПО КМ:** Юридическое или физическое лицо, разработавшее представленное к сертификации ПО КМ.

3.24 **расчетная модель:** КЭМ со всеми приложенными нагрузками, граничными условиями и характеристиками материалов.

3.25 **расчетный режим:** Совокупность всех нагрузок и граничных условий, для которых необходимо найти решение.

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

3.27

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

[ГОСТ Р 57700.2—2017, статья 3.1.2]

3.28

твердотельная модель: Трехмерная электронная геометрическая модель, представляющая форму изделия как результат композиции заданного множества геометрических элементов с применением операций булевой алгебры к этим геометрическим элементам.

[ГОСТ 2.052—2015, статья 3.1.10]

3.29

тестовая задача: Задача для проверки математической модели или программного комплекса при верификации или валидации.

[ГОСТ Р 57188—2016, статья 2.1.19]

3.30

точность: Оценка разницы между параметром или полученным значением (или набором параметров или полученных значений) в рамках расчета, моделирования или эксперимента, и истинным значением или предполагаемым истинным значением. Чем меньше указанная разница, тем выше точность.

[СТО СИТИС-201-16А, статья 2.4.11]

3.31 **упругая область:** Область реализации внешних и внутренних воздействий, в которой возникающие в каждой точке конструкции напряжения и деформации, не равные нулю в произвольный момент времени, становятся равными нулю или же исходным значениям до приложения нагрузки при исчезновении воздействий.

3.32 **характеристики материала:** Набор значений определенных свойств материала, принятый по справочным данным или полученный по результатам различных испытаний образцов и необходимый для проведения расчетов. Минимальный набор для численного моделирования НДС в упругой области включает в себя: значения модуля упругости и коэффициента Пуассона. Для учета инерционных сил должна быть задана плотность материала, для расчета температурных напряжений — коэффициент линейного температурного расширения.

3.33 **элементные технологии:** Методы и средства, заложенные разработчиками в ПО КМ для повышения точности результатов, в том числе для нейтрализации явлений, приводящих к существенному завышению жесткости модели. Пример: выборочное интегрирование, смешанная формулировка элементов, в которых вводятся дополнительные неизвестные (например, гидростатическое давление) [2].

4 Обозначения и сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ПО — программное обеспечение;
КМ — компьютерное моделирование;
ИО — испытательное оборудование;
ЭУ — экспериментальные установки;
НДС — напряженно-деформированное состояние;
КЭМ — конечно-элементная модель;
МКЭ — метод конечных элементов;
МДТТ — механика деформируемого твердого тела.

5 Требования к подходу и организации проведения численного моделирования в упругой области НДС сложных элементов конструкций

5.1 Данный стандарт описывает порядок проведения численного моделирования без учета физической нелинейности при решении задач статики в упругой области для определения НДС сложных элементов конструкций с использованием МКЭ при формулировке в перемещениях. Используются допущения, принятые для механики деформируемого твердого тела, то есть применяется концепция сплошности вещества, иными словами, предполагается, что вещество непрерывно распределено по всему занимаемому им объему и целиком заполняет его.

5.2 Применяемое ПО КМ должно соответствовать следующим требованиям

5.2.1 ПО КМ должно пройти верификацию и валидацию [3], [4], а также быть проверено в рамках разнообразных квалификационных тестов и получить сертификат общепризнанных организаций.

5.2.2 ПО КМ должно быть сертифицировано с учетом требований ГОСТ Р 57700.1.

5.2.3 ПО КМ должно ограничивать запуск на счет или по крайней мере уведомлять пользователя в случае некорректной постановки задачи.

5.2.4 ПО КМ должно позволять определять НДС конструкции с учетом геометрической нелинейности.

5.2.5 Рекомендуется применять ПО КМ, в которое внедрены разнообразные элементные технологии для снижения влияния негативных эффектов, в том числе приводящих к завышению жесткости системы (заниженному уровню перемещений системы).

5.3 Используемая для проведения КМ КЭМ должна соответствовать следующим требованиям

5.3.1 Не допускается при генерации КЭМ с применением трехмерных твердотельных элементов использовать для тонкостенных конструкций менее трех элементов по толщине.

5.3.2 Допускается использовать пластинчатые или оболочечные элементы.

5.3.3 Нежелательно использовать треугольные и тетраэдральные элементы первого порядка при проведении численного моделирования в 2D- и 3D-постановках соответственно.

5.3.4 Рекомендуется использовать элементы второго порядка (с промежуточными узлами). Использование элементов первого порядка возможно при обосновании допустимости применения таких элементов для данной задачи.

5.3.5 Необходимо использовать контактные элементы для учета взаимодействия нескольких геометрических тел в рамках одной численной модели.

5.3.6 Допускается для сокращения времени расчетов применять модели меньшей размерности [0D (сосредоточенная масса) 1D и 2D], если это соответствует физической сущности задачи.

5.3.7 Допускается использовать условия циклического или периодического типов симметрии для уменьшения расчетной области и сокращения временных затрат, если объект обладает такими свойствами.

5.3.8 При подготовке к построению КЭМ геометрическая модель должна быть предварительно проверена на наличие дефектов, необъясняемых конструктивным обликом геометрической модели: поверхностей с острыми углами, геометрических объектов существенно меньшего размера по сравнению с габаритами модели, разрывов в непрерывности и т. д. При наличии указанных дефектов должна быть проведена коррекция геометрической модели.

5.3.9 Допускается упрощать геометрическую модель для ускорения генерации сетки (например, проводить операции по удалению фасок и галтелей, объединению линий и поверхностей). Эти операции не должны приводить к изменению НДС в «критических местах» рассматриваемых конструкций. Рекомендуется проводить сравнительные расчеты при принятии решений по упрощению геометрической модели.

5.3.10 Для построения КЭМ надлежащего качества над геометрическими моделями помимо коррекции и упрощения должны быть проведены действия по разделению геометрической модели на объемы упрощенной формы. Рекомендуется выделять части геометрической модели, на базе которых может быть сгенерирована упорядоченная сетка (в том числе методом протяжки), в отдельные объемы. Топология смежных объемов при их разделении должна быть сохранена. То есть количество вершин, граней и поверхностей на общей границе должно совпадать. Должна выполняться проверка твердотельной модели на наличие сдвоенных поверхностей и линий.

5.3.11 Допускается для построения КЭМ использовать сторонние сеточные генераторы при соблюдении требований к геометрии и проведении сравнительных численных исследований влияния импорта/экспорта геометрических моделей и КЭМ на результат.

5.4 Для оценки качества КЭМ необходимо использовать различные критерии. Применение каждого из перечисленных ниже критериев является необходимым, но недостаточным условием КЭМ высокого качества.

5.4.1 Критерии, основанные на геометрическом совершенстве элементов

Разработчики ПО КМ вправе использовать различные подходы к данному виду оценки, однако их суть должна сводиться к тому, чтобы определять отличие используемых элементов от элементов идеальной формы. Разработчики ПО обязаны предоставлять количественные оценки качества сетки, подкрепленные конкретными верификационными примерами.

5.4.2 Критерии, основанные на исследовании изменения напряжений в узле в смежных элементах

При определении напряжений в точках интегрирования значения напряжений в узле КЭМ в смежных элементах будут различными. Сетка является тем более высокого качества, чем меньше параметр, характеризующий отношение разницы между максимальным и минимальным величинами напряжений к среднему в узле между смежными элементами. Этот параметр не должен превышать 10 % в критических местах модели.

5.4.3 Критерии, основанные на исследовании зависимости напряжений от количества элементов

Необходимо провести серию последовательных расчетов, увеличивая в каждом выполняемом расчете число элементов КЭМ. Расчеты остановить и признать годной к применению КЭМ, когда разность вычисленных напряжений в наиболее напряженных зонах исследуемой конструкции в двух последовательных расчетах не будет превышать наперед заданного значения, определяемого требованиями к точности выполняемых расчетов и степенью ответственности исследуемой конструкции.

5.4.4 Допускается использование элементов невысокого качества в заведомо некритичных местах конструкции.

5.4.5 Разработчик ПО КМ может вводить дополнительные критерии оценки.

5.5 Расчетная модель должна удовлетворять следующим требованиям

5.5.1 Обоснованность применения граничных условий и корректность используемых методов для расчета нагрузок должны быть подтверждены.

5.5.2 Если рассчитываемый элемент сложной конструкции работает в условиях неравномерного нагрева, то характеристики материала необходимо задавать во всем диапазоне рабочих температур (например, в виде табличных данных). Допускается использование линейной интерполяции для определения характеристик промежуточных значений.

Для ответственных деталей, разрушение которых может привести к человеческим жертвам или существенному экономическому ущербу, необходимо учитывать рассеяние характеристик и использовать в расчетах статистически обоснованные минимальные характеристики материалов, если это предусмотрено нормирующими в отрасли документами.

5.5.3 Допускается для расчетов нагрузок (в том числе полей температур) использовать КЭМ, отличную от той, на которой численно определяется НДС, при наличии проверенной методики пересчета нагрузок с одной КЭМ на другую.

5.6 Инженерная оценка

Проведение инженерной оценки (критического анализа) результатов является одним из этапов численного моделирования, которому должно быть уделено особое внимание. На данном этапе рекомендуется проводить анализ чувствительности результатов, применять сравнение с аналитическими методами, проводить обсуждение результатов с коллегами в рамках научно-технических совещаний.

5.7 Алгоритм проведения численного моделирования

5.7.1 В общем виде последовательность действий при численном моделировании НДС может быть сгруппирована следующим образом (см. рисунок 1).

5.7.1.1 Первый, наиболее трудно формализуемый этап — выбор размерности и принятие допущений в зависимости от цели и задач расчетов и от имеющихся в наличии исходных данных.

5.7.1.2 Второй этап — создание геометрической модели (выделен условно, так как зачастую выполняется в препроцессоре ПО КМ).

5.7.1.3 Третий этап — работа в препроцессоре, в ходе которой осуществляются выбор типов конечных элементов, построение и проверка КЭМ, приложение нагрузок и ГУ, ввод характеристик материала.

5.7.1.4 Четвертый этап — задание опций решателя и решение задачи.

5.7.1.5 Пятый этап — работа в постпроцессоре, в котором осуществляются инженерная оценка (критический анализ) и обработка результатов.

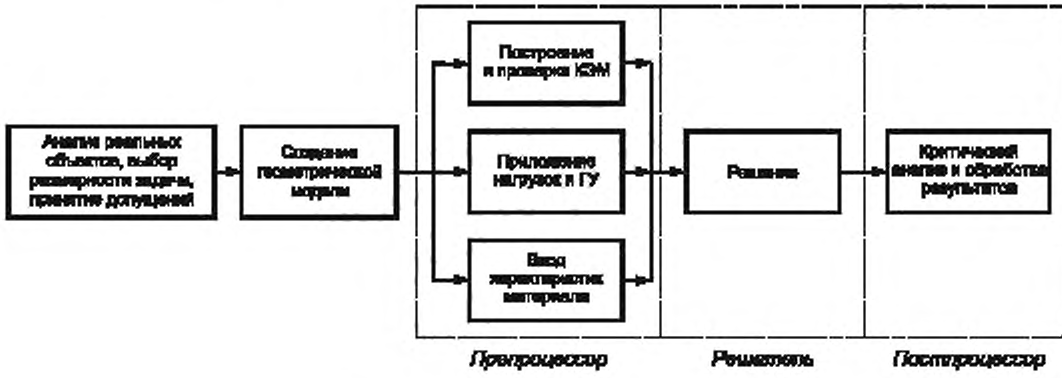


Рисунок 1 — Алгоритм проведения КМ НДС

5.7.2 Приведенный в 5.7.1 алгоритм является одним из возможных вариантов проведения КМ.

5.8 В случае неудовлетворительного совпадения с экспериментальными данными или получения новых значений, определяющих расчетную модель, она должна быть обновлена. Допускается использование опубликованных экспериментальных данных для валидации и верификации расчетной модели.

5.9 Пользователь ПО КМ должен для отработки и закрепления навыков проведения численных исследований выполнить расчеты, подтверждающие его умение достигать требований данного стандарта. Для этого необходимо использовать задачи с имеющимся аналитическим решением, такие как, например, задача Кирша [5] о растяжении пластины, ослабленной отверстием, и т. п. Вид и тип нагружения в отладочных расчетах должен соответствовать виду и типу, который относится к численному моделированию.

6 Требования к порядку верификации и валидации расчетной модели для численного моделирования в упругой области НДС сложных элементов конструкций

6.1 Достоверность расчета с использованием разработанной расчетной модели может быть достигнута при обеспечении:

- геометрической достоверности;
- физической достоверности;
- верификации ПО КМ;
- верификации расчетной модели;
- валидации расчетной модели,
- валидации ПО КМ;
- проведения количественной оценки неопределенностей.

6.2 Верификация и валидация расчетной модели являются необходимыми операциями для обоснования способности ПО КМ моделировать работу конструкции (и/или ее элементов) и рассчитывать параметры, необходимые для обоснования технических характеристик продукции с заявляемой погрешностью рассчитываемых параметров.

6.3 По итогам верификации и валидации ПО КМ и расчетной модели выпускаются отчеты о верификации и валидации.

6.4 Состав и содержание отчета о верификации и валидации должны соответствовать требованиям настоящего стандарта. Структура и описание разделов отчета о верификации и валидации приведены в ГОСТ Р 57700.1.

6.5 Матрица верификации расчетной модели для каждого моделируемого объекта и/или его элемента представляется в виде таблицы и является иллюстрацией того, в какой области проведена верификация расчетной модели.

Рекомендуемая структура матрицы верификации расчетной модели приведена в приложении А.

6.6 Валидационный эксперимент должен соответствовать следующим требованиям:

6.6.1 Эксперимент должен планироваться расчетчиками и экспериментаторами совместно. Накопленные экспериментальные данные, вне зависимости от того, подтверждают они расчетную модель или нет, должны быть тщательно описаны и занесены в отчет.

6.6.2 Границы области применения результатов валидационных экспериментов должны выбираться так, чтобы заведомо включить все расчетные случаи в будущем [3] (см. рисунок 2). При этом несовершенство экспериментального оборудования должно закладываться в эксперимент.



Рисунок 2 — Выбор области валидации

6.6.3 Валидационный эксперимент должен быть как можно более независимым от валидационного расчета. Рекомендуется применять слепое тестирование. Все нагрузки и граничные условия должны быть замерены в ходе эксперимента.

6.6.4 Должна быть обеспечена иерархия экспериментальных и расчетных исследований, которая заключается в постепенном повышении уровня сложности.

6.6.5 Должны быть использованы статистические методы для выявления и количественного определения случайных ошибок.

6.7 В качестве эталонных могут использоваться результаты расчетов, выполненные с помощью сертифицированного ранее ПО КМ и верифицированных/валидированных моделей.

6.8 Рекомендуемая структура матрицы валидации приведена в приложении А.

6.8.1 Физические явления и/или процессы и/или виды воздействия, включенные в матрицу валидации, должны быть подробно описаны.

6.8.2 Должно быть приведено обоснование достаточности информации, включенной в матрицу валидации, для подтверждения адекватности полученных с применением расчетной модели значений параметров и их погрешностей в заявленном диапазоне применения ПО КМ.

Приложение А
(рекомендуемое)

Структура матрицы верификации и валидации расчетной модели для численного моделирования в упругой области НДС сложных элементов конструкций

Рассчитываемые параметры: (перечисление)
Методика расчета: (краткое название)
Характеристики расчетов: (краткая характеристика)

Таблица А.1

Название теста	Диапазон изменения параметров							
	Количество расчетов	Параметр 1			Параметр 2		Параметр ...
		Значение 1	Значение 2	...	Диапазон 1	Диапазон 2	...
Тест № 1 (Характеристика теста, источник)							
Тест № 2							

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

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

Рассчитываемые параметры: (перечисление)
Методика расчета: (краткое название)
Эксперименты: (перечисление экспериментов, использованных для валидации)
Характеристики расчетов: (краткая характеристика)

Таблица А.2

Тип проверки результатов расчетов		Диапазон изменения параметров											
		Кол-во тестов	Режим			Экспериментальные данные			Параметр 1			Параметр 2	
Сравнение с альтернативными ПО КМ	Тест № 1 (наименование ПС, источник)												
	Тест № 2												
Сравнение с экспериментом	Эксперимент № 1 (название установки, источник)												
	Эксперимент № 2												

В таблице должно быть указано:

а) Отношение явлений к режимам:
   1) "+" — имеет место и является определяющим;
   2) 0 — частично встречается;
   3) "–" — отсутствует;

б) Воспроизведение режимов на ЭУ (ИО):
   1) "+" — воспроизведены;
   2) 0 — ограниченно воспроизведены;
   3) "–" — не воспроизведены;

в) Применимость экспериментальных данных:
   1) "+" — применимы для проверки;
   2) 0 — частично применимы для проверки;
   3) "–" — не применимы для проверки.

Библиография

[1] Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. — М.: МИР, 1975. — 542 с.

[2] Bathe K.J. Finite element procedures. — Klaus-Jurgen Bathe, 2006.

[3] Aeschliman D.P., Oberkampf W.L. Experimental methodology for computational fluid dynamics code validation // AIAA journal. — 1998. — Т. 36. — № 5. — С. 733—741.

[4] ASME V&V 10-2006, Guide for verification and validation in computational solid mechanics, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2006.

[5] Timoshenko S.P., Goodier J.N., Theory of Elasticity. — 3 ed., McGraw-Hill, NY, 1970.

УДК 519.642.2:006.354 ОКС 35.020

Ключевые слова: моделирование, численное моделирование, физические процессы, верификация, валидация, напряженно-деформированное состояние

БЗ 1—2018/81

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. 1,86. Уч.-изд. л. 1,68. Тираж 22 экз. Зак. 409.

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 stinfo.ru

gost.e-ecolog.ru