

doi: 10.32620/oikit.2020.87.12

УДК 004.94

С. П. Светличный

Использование инструментов Meshing Toolbox для подготовки и создания конечно-элементных моделей

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Подготовка геометрии и построение качественной конечно-элементной сетки представляют собой один из ключевых этапов выполнения расчетов с использованием компьютерных средств численного моделирования. Поэтому грамотное владение инструментальными средствами, используемыми для создания конечно-элементных моделей, является практически необходимым навыком, определяющим эффективность и производительность проведения численного анализа, а также влияет на точность и время получаемого результата.

Рассмотрены функциональные возможности меню **Meshing Toolbox** конечно-элементного пакета **FEMAP v. 10.2**, используемые при подготовке и создании конечно-элементных моделей объектов сложной формы. Целью работы является построение высококачественных, структурированных конечно-элементных сеток для объектов, имеющих сложную геометрию и снижение размерности расчетной модели. На ряде практических примеров рассмотрены методы повышения качества сетки в локальных зонах модели со сложной геометрией и снижения размерности численной модели. Полезным и удобным свойством рассмотренных инструментов является то, что при изменении исходной геометрии модели выполняется автоматическое перестроение конечно-элементной сетки.

Эффективное применение инструментальных средств по подготовке и созданию конечно-элементных сеток позволяет строить упорядоченные гексаэдральные сетки и тем самым существенно сократить размерность конечно-элементных моделей, повысив их вычислительную эффективность. В зависимости от степени сложности модели количество элементов в модели уменьшилось в разы, а число узлов – в среднем на 20%. Вопрос применения описанного подхода и рассмотренных в работе инструментальных средств приобретает особую актуальность при работе с моделями, имеющими большую размерность и в условиях ограниченных вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: метод конечных элементов, конечно-элементная сетка, импорт геометрии, доработка геометрии, структурированная сетка, форма элемента, размерность модели.

Введение

В практике проектирования промышленных изделий, а также при проведении научных исследований приходится сталкиваться с необходимостью выполнения расчетов объектов [1–6], имеющих сложную геометрическую форму. Подобные расчеты выполняют на компьютерах с использованием приближенных численных методов. Метод конечных элементов является наиболее эффективным и широко применяемым численным методом решения прикладных задач математической физики. Благодаря стремительному развитию средств вычислительной техники, а также простоте и удобству формализации метода на ЭВМ метод стал незаменимым инструментом для решения сложных прикладных задач и реализован во многих современных расчетных пакетах прикладных программ. Основная идея метода [7] заключается в том, что расчетная область, в которой ищется приближенное

решение исходной дифференциальной задачи, разбивается на конечное количество подобластей (элементов). Для каждого из элементов произвольно задается вид аппроксимирующей функции чаще всего в виде полинома первой или второй степени. Значения функции на границах элементов (в узлах) заранее неизвестны и являются решением задачи. Коэффициенты аппроксимирующей функции определяют из условия равенства значений функций в узлах конечных элементов. Составляют систему линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах прямо пропорционально количеству конечных элементов и с практической точки зрения ограничивается только возможностями компьютера, используемого для решения конкретной задачи. Исходя из этого становится очевидным, что при расчете сложных сборок, состоящих из большого количества деталей и узлов, имеем дело с конечно-элементными моделями больших размерностей, что требует значительных вычислительных ресурсов и времени. Безусловно, что прогресс не стоит на месте и во многих современных расчетных пакетах реализована концепция высокопроизводительных компьютерных вычислений [8, 9], предполагающая использование суперкомпьютеров и распределенных вычислительных узлов для решения задач большой размерности. Однако следует отметить, что данная опция является дорогостоящей и доступна ограниченному числу пользователей. В связи с этим актуальной практической задачей является создание эффективных с точки зрения вычислительных затрат конечно-элементных моделей.

Обзор функциональных возможностей меню **Meshing Toolbox**

В настоящее время во многих современных расчетных пакетах прикладных программ имеется возможность импорта геометрических моделей из большинства современных CAD систем (CATIA, UNIGRAPHICS, SOLID WORKS, PRO ENGINEER и др.) посредством стандартных форматов обмена данными, таких, как IGES, STEP, PARASOLID, SAT, STL, I-DEAS и др. На практике оказывается, что процесс импорта геометрии проходит не всегда «безболезненно»: один класс объектов преобразуется в другой, происходит потеря отдельных объектов и т.п. Причиной данных проблем, возникающих при импорте, является различие в математическом аппарате, используемом для описания геометрических объектов в различных системах и различие в точности описания геометрии. Кроме того, при построении конечно-элементной модели, выполняют упрощение исходной геометрии путем исключения отдельных не влияющих на точность расчета мелких элементов, таких, как отверстия малого диаметра, фаски, скругления, пазы малой глубины и т.п. Поэтому с практической точки зрения важно иметь набор инструментов, позволяющих доработать исходную геометрию и построить качественную конечно-элементную сетку. В данной статье на примере конечно-элементного пакета **FEMAP** версии 10.2 [10] рассмотрены возможности меню **Meshing Toolbox** [11–13] (рис. 1) по подготовке геометрии и построению структурных конечно-элементных сеток.

Первые две опции данного меню **Feature Suppression** and **Feature Removal** позволяют пользователю исключить из модели мелкие геометрические объекты: замкнутые контура, кривые и поверхности. Причем первая опция дает возможность временно деактивировать в модели «мелкие»

геометрические объекты с возможностью последующей их активации. Опции содержат триггерную кнопку **Limit Size**, при включении которой имеется возможность задания предельного значения размера, определяющего «малость» объекта.

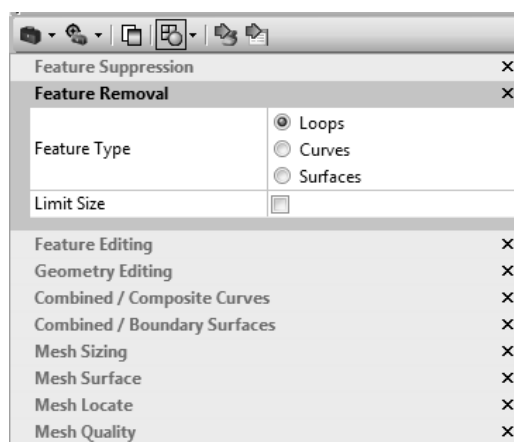


Рис. 1. Меню **Meshing ToolBox**

Таким образом, при использовании данной функции из модели автоматически будут исключены объекты, размер которых не превышает указанное в поле **Smaller Than** значение. Данная опция удобна, когда в модели нужно исключить множество мелких объектов. На рис. 2 показан пример использования опции **Feature Suppression**. Исходная модель (рис. 2, а) содержит четыре отверстия малого диаметра. На рис. 2, б показана модель, в которой данные отверстия деактивированы. Данная опция применима не только к отверстиям, но и к выступам различной формы. Однако функциональные возможности данной опции все же ограничены.

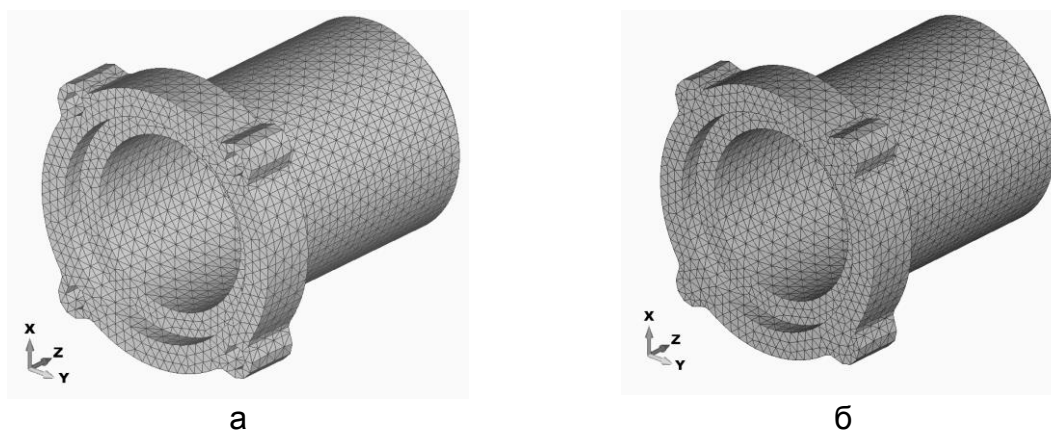


Рис. 2. Конечно-элементная модель корпуса

При работе со сложными моделями, содержащими множество мелких элементов, в дополнение к опции **Feature Suppression** эффективно использовать опцию **Feature Removal**. Данная опция в отличие от опции **Feature Suppression** позволяет удалить мелкие объекты из исходной геометрической модели.

Рассмотрим работу данной опции на примере кронштейна (рис. 3), содержащего на вертикальной полке четыре отверстия малого диаметра и

радиусы скругления по контуру кронштейна и на ребре жесткости. Базовая конечно-элементная модель (рис. 3, а) содержит **5285** узлов и **22927** элементов, имеющих форму тетраэдра, при среднем размере грани элемента, равном 3 мм.

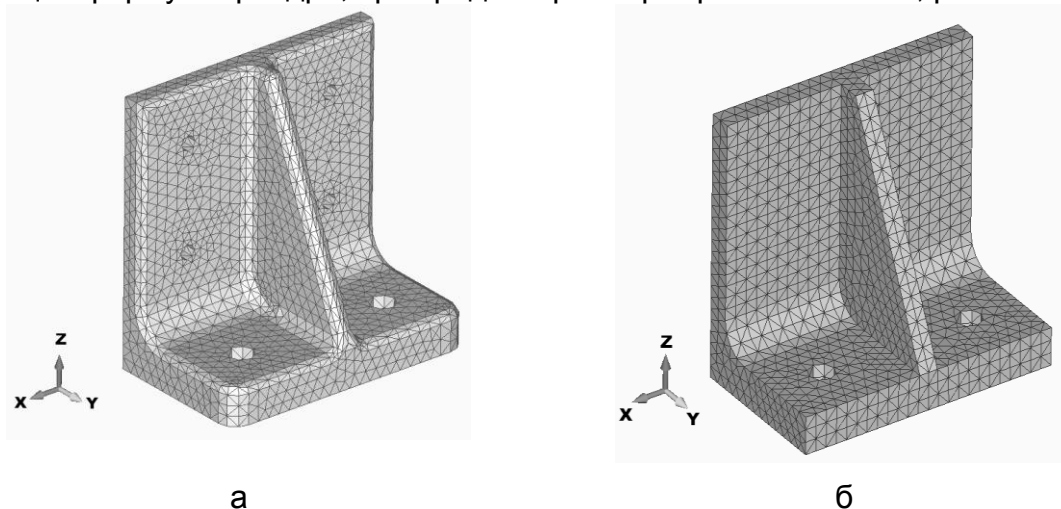


Рис. 3. Конечно-элементная модель кронштейна

После доработки геометрии базовой модели путем удаления четырех отверстий малого диаметра и радиусов скруглений количество узлов в модели уменьшилось до **3826**, а число элементов – до **16279** (см. рис. 3, б). Упрощение исходной геометрии позволило понизить размерность модели: число узлов уменьшилось на 28%, а количество элементов – на 29 %.

Дальнейшая доработка модели кронштейна касается построения структурированной конечно-элементной сетки, содержащей элементы в форме гексаэдра. Для этого необходимо разбить исходный объем на ряд простых по форме примитивов, используя функцию **SOLID SLICE**. Результат применения данной операции показан на рис. 4, где слева показана схема разбиения исходной геометрии кронштейна на ряд объемов простой формы, а справа – структурированная конечно-элементная сетка, содержащая элементы в форме гексаэдра.

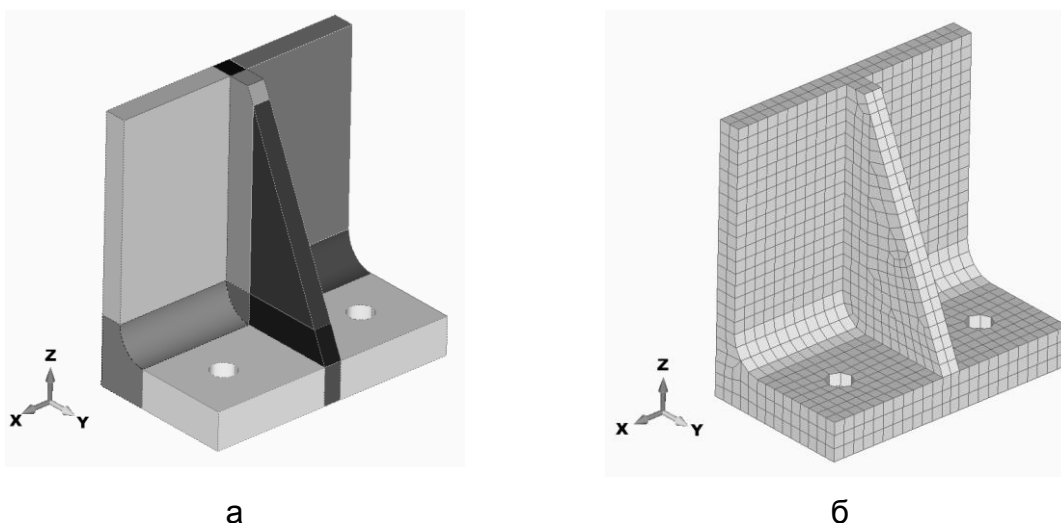


Рис. 4. Геометрия и регулярная конечно-элементная сетка кронштейна

В результате доработки модели количество узлов в модели составило **3414**, а число элементов – **2252**. Сравнивая конечно-элементные модели кронштейна, показанные на рис. 3 и 4, можно отметить следующее: разбиение исходной геометрии на ряд простых геометрических примитивов позволило существенно понизить размерность модели: количество элементов уменьшилось в 7,2 раза, а число узлов – на 10,7%.

Однако для моделей со сложной геометрией процесс разбиения становится весьма трудоемким и не всегда практически осуществимым. Для построения структурированной гексаэдральной конечно-элементной сетки требуется комплексная доработка геометрии. Рассмотрим данный подход на примере модели фрагмента фрезерованной панели. Исходная геометрическая модель (рис. 5) содержит набор карманов, усилений, вырез круглой формы и ребра жесткости. Кроме того, в модели присутствуют радиусы скругления, фаски, глухие и сквозные отверстия малого диаметра. Детальный анализ отдельных зон модели позволяет выявить особенности геометрии, которые могут представлять потенциальные трудности при построении конечно-элементной сетки и как результат приводить к увеличению общей размерности модели (рис. 6, 7).

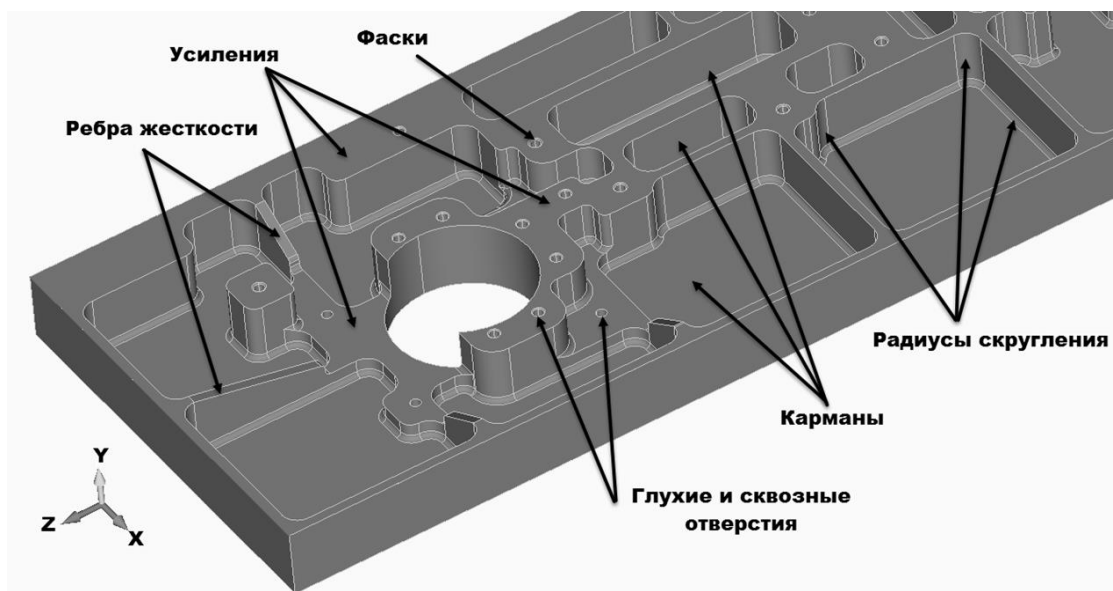


Рис. 5. Фрагмент геометрической модели панели

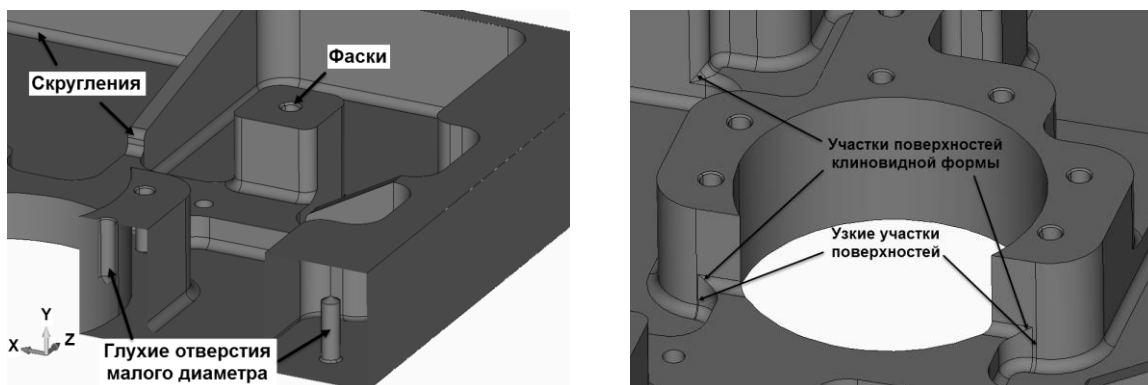


Рис. 6. Проблемные зоны в модели

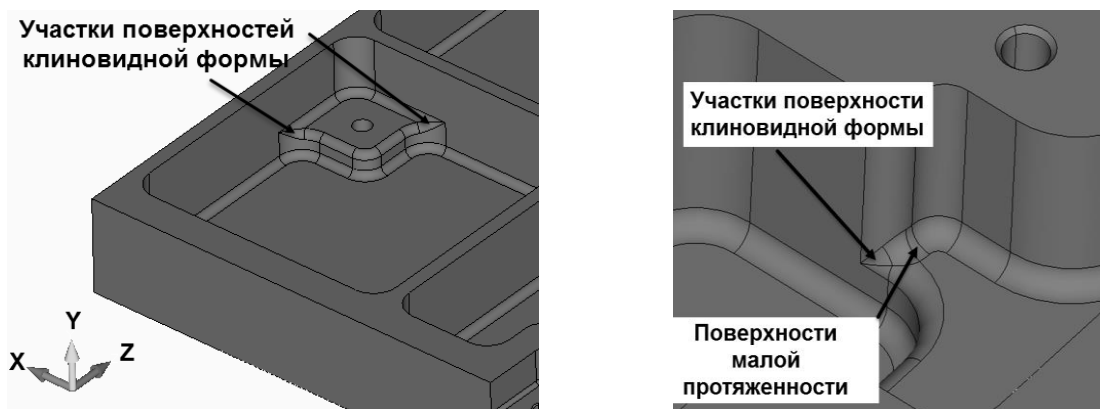


Рис. 7. Проблемные зоны в модели

На рис. 8 показана конечно-элементная сетка модели панели, полученная путем разбиения исходной геометрии на элементы в форме тетраэдров. Средний размер грани конечного элемента равен 3 мм. Анализ размерности исходной конечно-элементной модели панели показал, что модель содержит **334227** элементов, имеющих форму тетраэдра, и **75929** узлов.

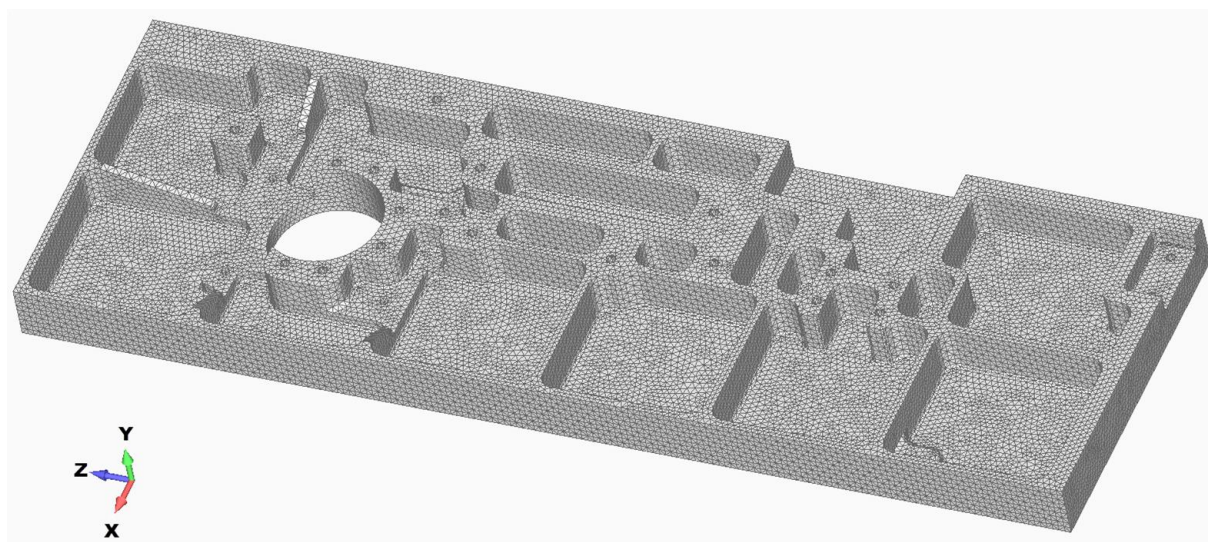


Рис. 8. Конечно-элементная модель панели

Проанализировано качество сетки (форма и размер элементов) в проблемных зонах. Так на рис. 9, а видна огранка цилиндрической поверхности глухого отверстия, что свидетельствует о недостаточном числе разбиений по высоте отверстия и в окружном направлении. Фаски отверстий и коническая поверхность гнезда разбиты на мелкие элементы с плохим соотношением длин сторон. В зоне утолщения, где сходятся в точку радиусы скругления на клиновидной поверхности, наблюдается измельчение сетки. Кроме того, имеет место грубая аппроксимация поверхности радиусного перехода утолщения в вертикальную стенку (см. рис. 9, б). Похожие проблемы прослеживаются и в зоне тройного радиусного перехода, где сопрягаются поверхности с разными радиусами кривизны. На поверхности вертикального радиуса скругления видна огранка с последующим измельчением сетки на поверхности скругления

меньшего радиуса. На участке поверхности клиновидной формы в окрестности точки, в которую сходятся радиусные переходы, локализованы вырожденные элементы с плохим соотношением сторон (см. рис. 9, в). И, наконец, в зоне, где один радиус переходит в другой, располагается узкий участок плоской поверхности, на котором сосредоточены вырожденные элементы с плохим соотношением длин сторон (см. рис. 9, г). Вырожденные элементы, локализованные в проблемных зонах модели, являются источником сингулярности напряжений, а это, в свою очередь, может приводить к нефизичным результатам и потере точности решения. Поэтому для устранения выявленных дефектов конечно-элементной сетки необходимо доработать исходную геометрию, убрав мелкие особенности геометрии.

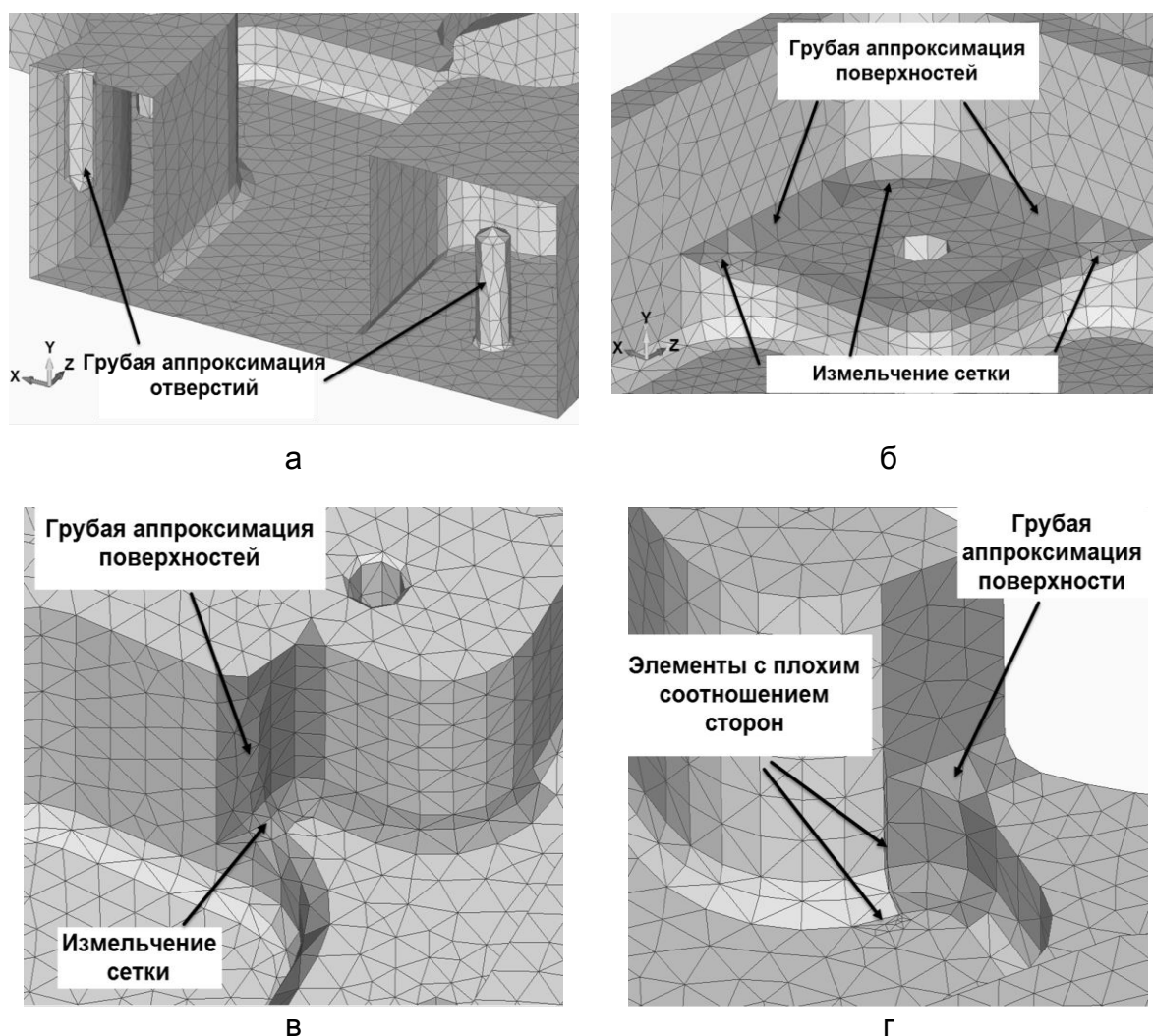


Рис. 9. Фрагменты конечно-элементной сетки в проблемных зонах

Доработка геометрии выполнена с использованием функции **Feature Removal** меню Meshing Toolbox. На рис. 10 показана конечно-элементная модель панели после доработки исходной геометрии.

В результате удаления мелких элементов, таких, как отверстия малого диаметра, а также радиусов скругления удалось уменьшить размерность

модели: количество элементов уменьшилось до **267322 (20%)**, а число узлов – до **62420 (18%)**.

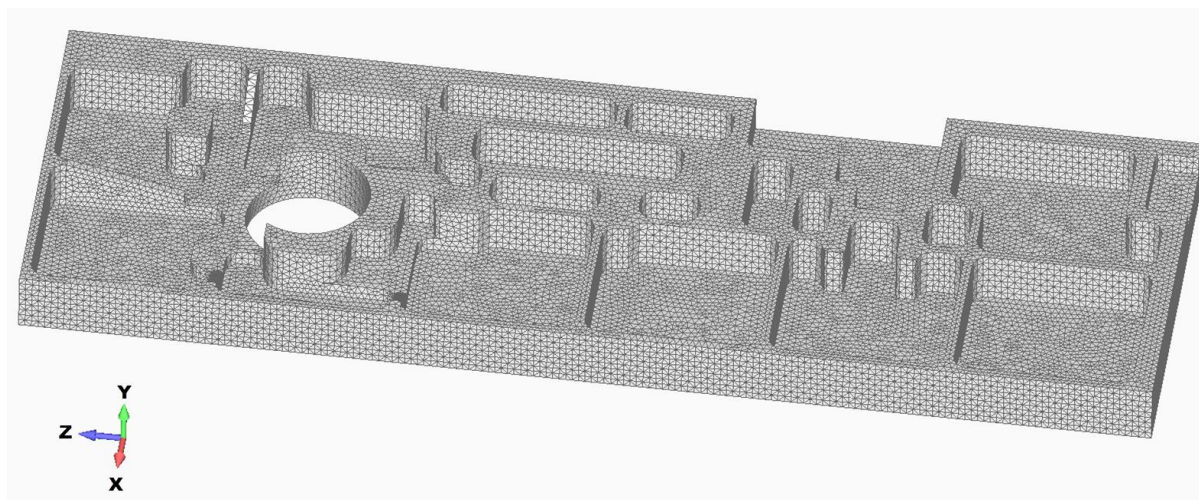


Рис. 10. Конечно-элементная модель панели после доработки исходной геометрии

Для дальнейшей доработки модели исходную геометрию разбили на ряд отдельных примитивов относительно простой формы, используя функции **SOLID SLICE** и **Embed Face**. Результат применения функций **SOLID SLICE** и **Embed Face** показан на рис. 11, где разные объемы отображены разными цветами.

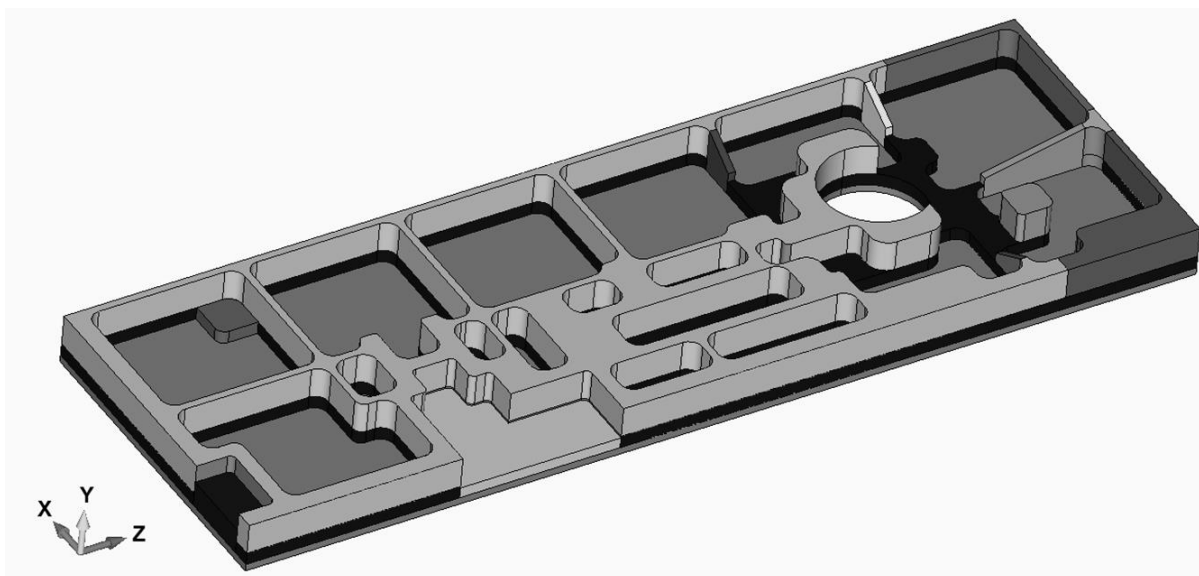


Рис. 11. Разбиение исходной геометрии на ряд независимых объемов

Практически полезными функциями при доработке геометрии являются функции объединения кривых **Combined/Composite Curves** и поверхностей **Combined/Boundary Surfaces** (рис. 12). Данные функции используют для объединения набора кривых или поверхностей в единую кривую или поверхность, а также для удаления объединенных кривых и поверхностей.

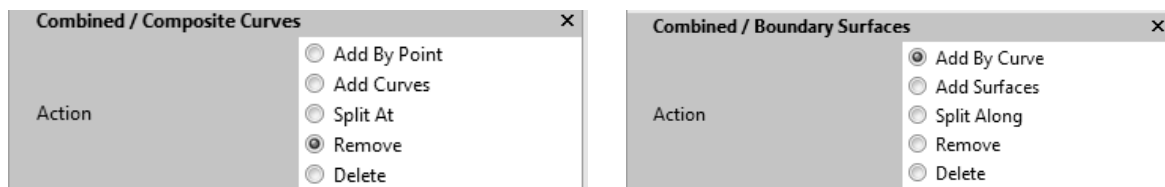


Рис. 12. Меню **Combined/Composite Curves** и **Combined/Boundary Surfaces**

На рис. 13, а показан фрагмент геометрии панели в зоне кармана, содержащий участки поверхностей малой ширины и большой протяженности (выделены зеленым цветом), что может служить причиной формирования в этой зоне мелких элементов с плохим соотношением сторон. Для устранения указанного недостатка выполним объединение данных поверхностей с расположенными ниже поверхностями. На рис. 13, б показан результат объединения поверхностей, которые отображаются серым цветом.

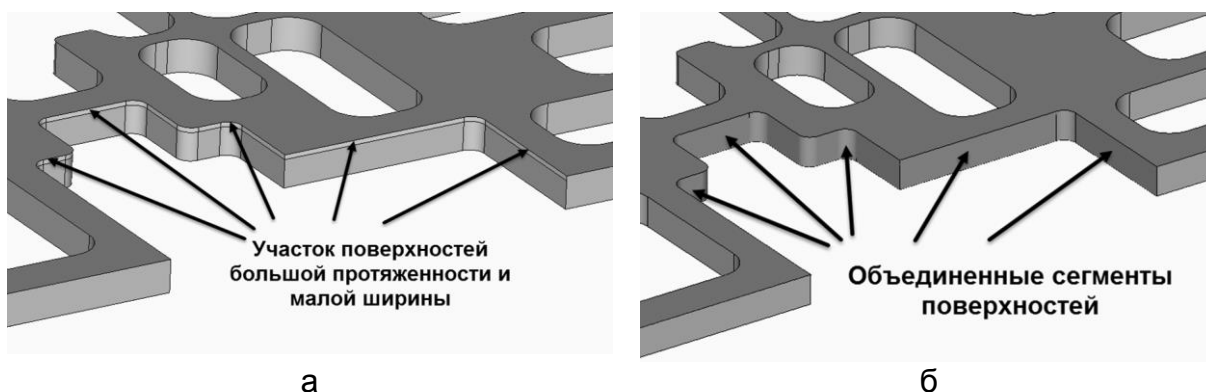


Рис. 13. Пример использования функции **Combined/Boundary Surfaces**

Фрагмент конечно-элементной сетки для данной части модели показан на рис. 14. Конечно-элементная сетка этой части модели состоит из двух равномерных слоев элементов, имеющих форму гексаэдра. Качество созданной сетки значительно выше, чем той, которая получена при разбиении исходной геометрии. Модель содержит незначительное количество вырожденных элементов со скошенными гранями в форме клина. Другой более крупный фрагмент конечно-элементной сетки (см. рис. 15) содержит набор гексаэдральных элементов с соотношением длин сторон, близким к единице. При среднем размере грани элемента, равном 3 мм, элементы корректно аппроксимируют криволинейные участки геометрии. Поскольку после разбиения независимых объемов модели панели узлы конечных элементов, лежащих на общих границах объемов, не связаны, то для сшивки сеток используем функцию **Connections**. При этом удобно пользоваться опцией автоматического создания связей **Automatic**. После чего выбираем все объемы и в меню **Auto Detection Option for Connections** задаем линейную (поле **Tolerance**) и угловую (**Angular Tolerance**) точность совпадения поверхностей, тип контакта – **Face-Face Only** и свойства – **Glued**.

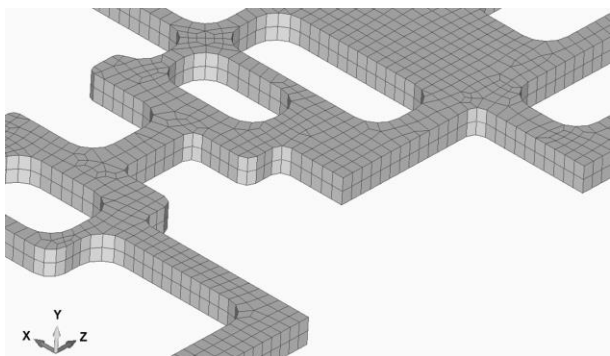


Рис. 14. Фрагмент конечно-элементной сетки панели в зоне усиления и карманов

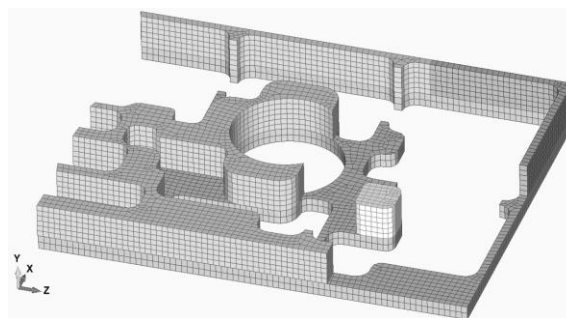


Рис. 15. Фрагмент структурированной конечно-элементной сетки

На рис. 16 показана конечно-элементная модель плиты, полученная в результате комплексной доработки исходной геометрии с помощью инструментов **Meshing Toolbox**.

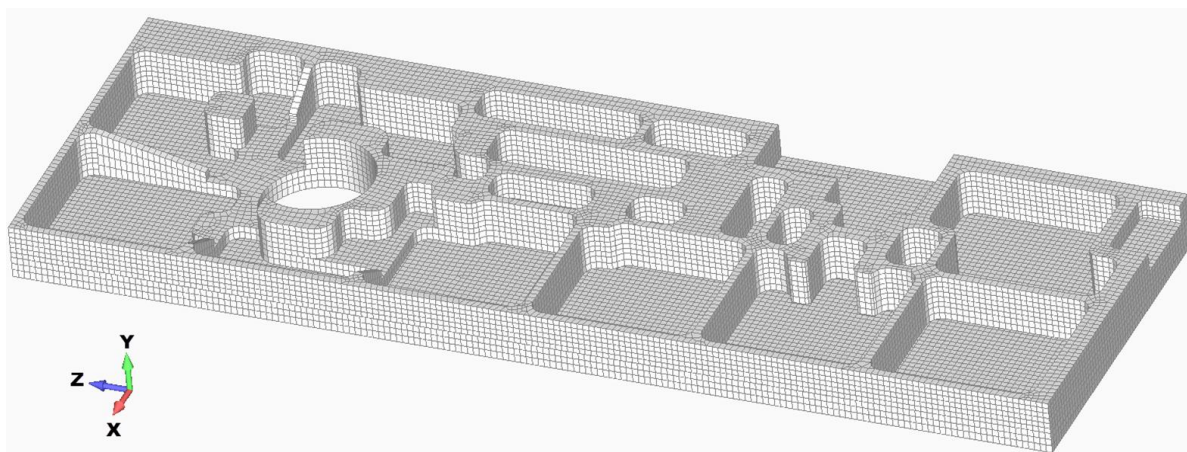


Рис. 16. Конечно-элементная модель плиты

Комплексное применение инструментальных средств доработки геометрии позволило создать качественную структурированную конечно-элементную сетку, содержащую конечные элементы в форме гексаэдров и уменьшить размерность модели, тем самым повысить ее вычислительную эффективность. Количество элементов в модели уменьшилось до **33977** (почти в **10** раз по сравнению с исходной моделью), а количество узлов – до **60282** (на **20,6%**).

В заключение рассмотрим еще одну полезную функцию меню **Meshing Toolbox** – **Feature Editing**. Данную опцию используют для базовой доработки геометрии: изменения положения отверстий, усиления, ребер жесткости, а также изменения размеров отверстий и других конструктивных элементов путем перемещения и вращения соответствующих поверхностей на заданное расстояние или угол в заданном направлении (рис. 17).

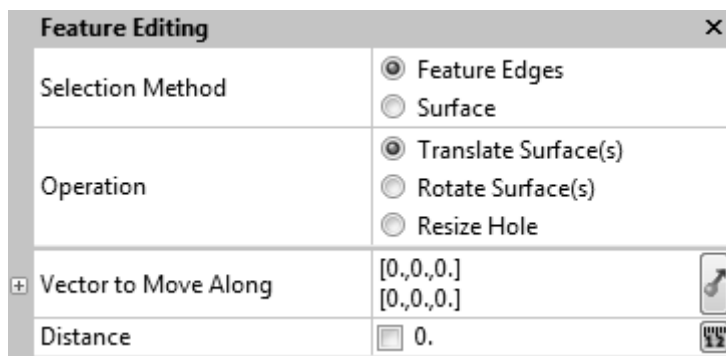


Рис. 17. Меню **Feature Editing**

Рассмотрим использование функции **Feature Editing** на примере конечно-элементной модели кронштейна, которая состоит из набора тетраэдральных элементов (рис. 18).

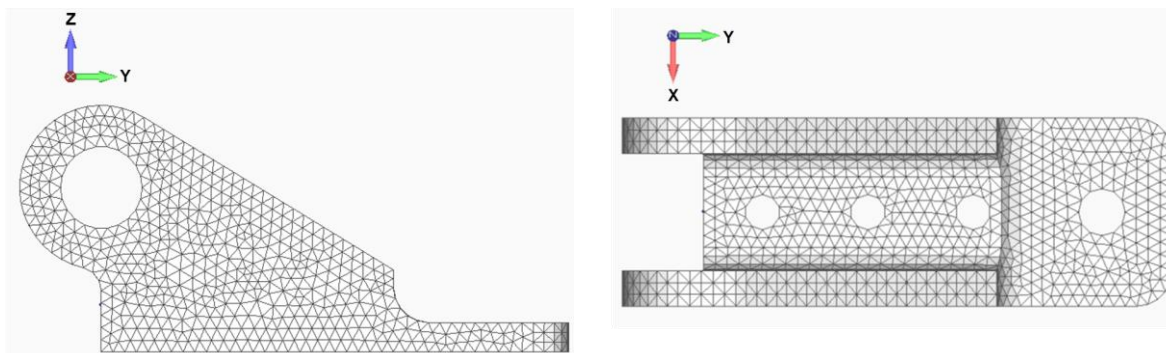


Рис. 18. Конечно-элементная модель кронштейна (базовый вариант)

Воспользуемся опцией **Resize Hole** для увеличения диаметра отверстий в проушинах кронштейна. В поле **Hole Diameter** указываем значение диаметра отверстий, после чего, используя кнопку выбора **Select**, выбираем кромку отверстия, диаметр которого хотим изменить. Результат выполнения операции показан на рис. 19. Рассмотрим еще один пример редактирования базовой геометрии.

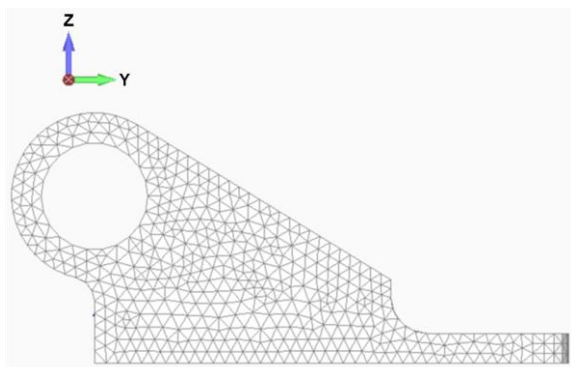


Рис. 19. Пример использования функции **Resize Hole**

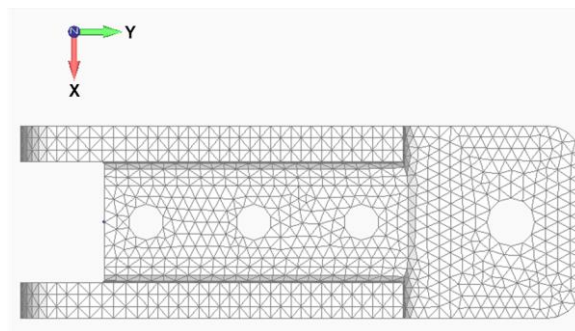


Рис. 20. Пример использования функции **Translate Surface(s)**

Воспользуемся опцией **Translate Surface(s)** для смещения влево трех отверстий в основании кронштейна на расстояние 3 мм (см. рис. 20), предварительно включив радиокнопку **Surface** в поле **Selection Method**.

Определенным удобством в работе является то, что при использовании различных инструментов меню **Meshing Toolbox** выполняется автоматическое перестроение конечно-элементной сетки, что ускоряет и повышает эффективность работы.

Выводы

Меню **Meshing Toolbox** содержит набор инструментов, используемых для подготовки и создания конечно-элементных моделей объектов, имеющих сложную геометрию. Овладение функциями меню делает работу по построению конечно-элементных моделей более эффективной, позволяет повысить качество конечно-элементной сетки, уменьшить размерность модели и повысить ее вычислительную эффективность.

Список литературы

1. EADS Astrium Satellite UK. Taking satellite development to new heights. – Режим доступа: <https://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/09/EADS-Astrium-Satellites-space.pdf>. – 5.03.2020. – Загл. с экрана.
2. Aquila Engineering. Faster FEA improves productivity and saves tens of thousand dollars. – Режим доступа: <https://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/09/Aquila-Engineering-aerospace.pdf>. – 5.03.2020. – Загл. с экрана.
3. Bureau Veritas. VeriSTAR Hull lets ship designers quickly determine if their designs conform to regulations. – Режим доступа: <https://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/09/Bureau-Veritas-marine.pdf>. – 5.03.2020. – Загл. с экрана.
4. Duraldul. Using Femap to test virtual prototypes of engine pistons save time and money; enable customer confidence. – Режим доступа: <https://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/09/Duraldul-automotive.pdf>. – 5.03.2020. – Загл. с экрана.
5. Ricersa sul Sistema Energetico. With the use of Femap, RSE has found an ideal tool for the finite element modeling of dams and other structures in the energy industries. – Режим доступа: <https://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/09/RSE-Energy.pdf>. – 5.03.2020. – Загл. с экрана.
6. Примеры внедрения Solid Edge и Femap на российских и зарубежных предприятиях. – Режим доступа: https://ideal-plm.ru/uEditor/files/4/SE_Femap_CS-brochure-Low-Res.pdf. – 5.03.2020. – Загл. с экрана.
7. Метод конечных элементов. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_конечных_элементов. 6.03.2020. – Загл. с экрана.
8. High Performance Computing with MSC Nastran. – Режим доступа: <http://pages.mscsoftware.com/rs/109-LAC-296/images/High%20Performance%20Computing%20with%20MSC%20Nastran.pdf>. 6.03.2020. – Загл. с экрана.
9. High Performance Computing. – Режим доступа: <https://www.ansys.com/-/media/ansys/corporate/resourcelibrary/brochure/ansys-hpc-brochure.pdf>. 6.03.2020. – Загл. с экрана.
10. FEMAP™ – Режим доступа: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/femap.html>. 6.03.2020.

11. Meshing Toolbox in FEMAP. – Режим доступа: <https://structures.aero/meshing-toolbox-femap/>. 6.03.2020.
12. Meshing Toolbox. FEMAP Tutorial. – Режим доступа: http://www.ataplmssoftware.com/wp-content/uploads/2019/03/Femap_Meshing_Toolbox_tutorial_sm.pdf. 6.03.2020. – Загл. с экрана.
13. Эффективные инструменты для подготовки геометрии в Siemens Femap 11.3. – Режим доступа: https://www.cad-is.ru/blog_post/presentation-of-new-version-femap-11-3-part-2. 6.03.2020. – Загл. с экрана.

References

1. EADS Astrium Satellite UK. Taking satellite development to new heights. Available at: https://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/09/EADS-Astrium-Satellites_space.pdf. (accessed 5.03.2020). – Загл. с экрана.
2. Aquila Engineering. Faster FEA improves productivity and saves tens of thousand dollars. Available at: https://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/09/Aquila-Engineering_aerospace.pdf. (accessed 5.03.2020). – Загл. с экрана.
3. Bureau Veritas. VeriSTAR Hull lets ship designers quickly determine if their designs conform to regulations. Available at: https://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/09/Bureau-Veritas_marine.pdf. (accessed 5.03.2020). – Загл. с экрана.
4. Duraldul. Using Femap to test virtual prototypes of engine pistons save time and money; enable customer confidence. Available at: https://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/09/Duraldur_automotive.pdf. (accessed 5.03.2020). – Загл. с экрана.
5. Ricerca sul Sistema Energetico. With the use of Femap, RSE has found an ideal tool for the finite element modeling of dams and other structures in the energy industries. Available at: https://www.femto.eu/wp-content/uploads/2017/09/RSE_Energy.pdf. (accessed 5.03.2020). – Загл. с экрана.
6. Primery vnedreniya Solid Edge i Femap na rossiiskikh i zarubezhnykh predpriyatiyakh [Examples of implementation of Solid Edge and Femap in Russian and foreign companies]. Available at: https://ideal-plm.ru/uEditor/files/4/SE_Femap_CS_brochure_Low_Res.pdf. (accessed 5.03.2020). – Загл. с экрана.
7. Metod konechnykh elementov [Finite Element Method]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_конечных_элементов. (accessed 6.03.2020). – Загл. с экрана.
8. High Performance Computing with MSC Nastran. Available at: <http://pages.mscsoftware.com/rs/109-LAC-296/images/High%20Performance%20Computing%20with%20MSC%20Nastran.pdf>. (accessed 6.03.2020). – Загл. с экрана.
9. High Performance Computing. Available at: <https://www.ansys.com/-/media/ansys/corporate/resourcelibrary/brochure/ansys-hpc-brochure.pdf>. (accessed 6.03.2020). – Загл. с экрана.
10. FEMAP™ Available at: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/femap.html>. (accessed 6.03.2020).
11. Meshing Toolbox in FEMAP. – Режим доступа: <https://structures.aero/meshing-toolbox-femap/>. 6.03.2020.

12. Meshing Toolbox. FEMAP Tutorial. Available at: http://www.atalmsoftware.com/wp-content/uploads/2019/03/Femap_Meshing_Toolbox_tutorial_sm.pdf. (accessed 6.03.2020). – Zagl. s ekrana.

13. Effektivnye instrumenty dlya podgotovki geometrii v Siemens Femap 11.3 [Effective tools for geometry preparation in Siemens Femap 11.3]. Available at: https://www.cad-is.ru/blog_post/presentation-of-new-version-femap-11-3-part-2. (accessed 6.03.2020). – Zagl. s ekrana.

Поступила в редакцию 11.02.2020, рассмотрена на редколлегии 12.02.2020

Використання інструментів Meshing Toolbox для підготовки і створення скінченно-елементних моделей

Підготовка геометрії та побудова якісної скінченно-елементної сітки являють собою один із ключових етапів виконання розрахунків з використанням комп'ютерних засобів чисельного моделювання. Тому грамотне володіння інструментальними засобами, які використовують для створення скінченно-елементних моделей, є практично необхідною навичкою, що визначає ефективність і продуктивність проведення чисельного аналізу, а також впливає на точність і час одержуваного результату.

Розглянуто функціональні можливості меню Meshing Toolbox скінченно-елементного пакета FEMAP v. 10.2, які використано при підготовці та створенні скінченно-елементних моделей об'єктів складної форми. Метою роботи є побудова високоякісних, структурованих скінченно-елементних сіток для об'єктів, що мають складну геометрію і зниження розмірності розрахункової моделі. На ряді практичних прикладів розглянуто методи поліпшення якості сітки у локальних зонах моделі зі складною геометрією і зниження розмірності чисельної моделі. Корисною і зручною властивістю розглянутих інструментів є те, що при зміні базової геометрії моделі виконується автоматичне перестроювання скінченно-елементної сітки.

Ефективне застосування інструментальних засобів з підготовки та створення скінченно-елементних сіток дозволяє будувати впорядковані гексадральні сітки і тим самим істотно скоротити розмірність скінченно-елементних моделей, підвищивши їх обчислювальну ефективність. Залежно від ступеня складності моделі кількість елементів у моделі зменшилася в рази, а число вузлів - у середньому на 20%. Питання застосування описаного підходу і розглянутих в роботі інструментальних засобів набуває особливої актуальності при роботі з моделями, що мають велику розмірність і в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Ключові слова: метод скінченних елементів, скінченно-елементна сітка, імпорт геометрії, доробка геометрії, структурована сітка, форма елемента, розмірність моделі.

Using the Meshing Toolbox for preparation and creation of finite element models

Geometry preparation and construction of high-quality finite element mesh is one of the key steps of analysis using computer aided engineering tools. Therefore, rational application of tools used for creation of finite element models is useful skill

that determines the efficiency and productivity of numerical analysis and also effects the accuracy and time required for getting the result.

The capabilities of the **Meshing Toolbox** of **FEMAP v. 10.2** finite element software, which are used for preparation and creation of finite element models of the objects with complex geometry, are described in the paper. The goal of the work is to build high-quality, mapped meshes for objects with complex geometry and reduce the dimension of the finite element model. Methods for improving the quality of the mesh in the local areas of a model with complex geometry and reducing the dimension of a model are considered using several practical examples. A useful and practical feature of the tools is that automatic remeshing is provided in case of changing the basic geometry. The effective application of tools for preparation and creation of finite element models allows you to build mapped hexahedral meshes and thereby significantly reduce the dimension of finite element models, increasing their computational efficiency. Depending on the degree of complexity of the model, the number of elements in the model decreased by several times, and the number of nodes — on average, by 20%. The issue of applying the described approach and tools is especially concern for large models and in case of limited computational resources.

Key words: finite element method, finite element mesh, import of geometry, geometry healing, mapped mesh, element shape, model dimension.

Сведения об авторах:

Светличный Сергей Петрович – к.т.н, старший преподаватель кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, эл. почта: s.svetlichniy@khai.edu, тел.: 099 632-88-54, ORCID: 0000-0001-5103-1999.

About the Authors:

Svetlichniy Sergey – Candidate of Technical Sciences, senior teacher of theoretical mechanics, machinery design and robotics systems department, National Aerospace University named after N.E. Zhukovsky “Kharkov Aviation Institute”, Kharkov, Ukraine, e-mail: s.svetlichniy@khai.edu, Phone: 099 632-88-54, ORCID: 0000-0001-5103-1999.