

УДК 629.4.015

Метод локальной адаптации конечно-элементных сеток при исследовании НДС конструкций с малоразмерными геометрическими элементами

© Д.А. Еловенко, Д.П. Носков, Г.И. Вальдимат, Р.С. Сигов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

В статье представлена оригинальная методика генерации качественных адаптивных конечно-элементных сеток в полуавтоматическом режиме на геометрическом объекте, имеющем две плоскости симметрии и малоразмерный элемент, имеющий отличие от габаритных размеров объекта на 2 и 3 порядка. Практическая реализация методики осуществляется в препроцессорной среде моделирования Siemens FEMAP, где показаны особенности основных этапов предварительной подготовки геометрии модели, определение алгоритма и генерация конечно-элементной сетки, обеспечение ее качества по основным критериям. Наглядно продемонстрирован способ объединения разномасштабных конечно-элементных сеток.

Ключевые слова: геометрическая модель, конечно-элементная сетка, малоразмерные элементы, метод склейки

Method of local adaptation of finite element meshes in the study of VAT designs with small geometric elements

© Denis A. Elovenko, Denis P. Noskov, Gregory I. Valdimat, Gregory I. Valdimat, Roman S. Sigov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

The article presents the original method of generating high-quality adaptive finite element grids in a semi-automatic mode on a geometric object that has two planes of symmetry and a small-sized element that differs from the overall dimensions of the object by 2 and 3 orders. The practical implementation of the methodology is carried out in the Siemens FEMAP pre-processor modeling environment, which shows the features of the main stages of preliminary preparation of the model geometry, the definition of the algorithm and the generation of the finite-element mesh, ensuring its quality according to the main criteria. The method of combining different-scale finite-element meshes is clearly demonstrated.

Keywords: geometric model, finite element mesh, small-sized elements, gluing method

Актуальность темы и обзор имеющихся исследований

Узлы и детали машин, а также их опытные и лабораторные прототипы, нередко представленные некими образцами для испытаний в многообразии своих геометрических особенностей, могут содержать мелкоразмерные элементы. Такие элементы представляют собой различные концентраторы напряжений в зонах повышенной вероятности разрушения объектов исследования и содержат контрольные точки для регистрации определенных оценочных характеристик (тензоры и векторы напряжений, компоненты перемещений и т.д.).

Методическая проблема формирования качественных конечно-элементных сеток в моделях численного анализа с мелкоразмерными элементами остается всегда актуальной. Различие подходов к ее решению кроется в разности геометрических размеров элементов исследуемого объекта, свойствах его материала, инструментах генерации конечно-элементных сеток и типах анализа моделей (моделируемых процессах и явлениях).

Итак, одной из базовых проблем формирования качественных конечно-элементных сеток является генерация нерегулярных сеток, подходы к решению которой основаны на правильной дискретизации расчетной (исследуемой) области и представлены в [1]. Исследуемый в работе объект (образец) представлен композитным материалом.

Проблема построения адаптивных сеток решалась на основе обращенных уравнений Бельтрами и диффузии относительно управляющей метки [2]. Предложенное авторами этой работы решение позволяет строить корректные сетки в областях со сложными геометрическими контурами. Ими приведены примеры двумерных структурированных адаптивных се-

ток, построенных на основе авторской методики. В работе [3]. также представлены примеры двух- и трехмерных адаптивных сеток с локальными сгущениями.

Как уже говорилось, подходы к формированию качественных конечно-элементных сеток могут зависеть и от особенностей моделируемых процессов. В случае моделирования роста трещин это особенно важно [4]. В этих работах исследуется влияние геометрии сетки на точность решений задач линейной механики разрушения. Даны руководящие принципы построения оптимальной сетки для нескольких типовых задач, использующих конечные элементы с линейной и квадратичной аппроксимацией смещений. Точность численного решения оценена по степени отличия вычисленного коэффициента интенсивности напряжений.

Похожая с точки зрения принципа генерации конечно-элементной сетки и объекта моделирования работа представлена в исследовании связанного разрушения цилиндрической оболочки от гидродинамического разрыва [5]. Здесь показано локальное сгущение сетки в области моделируемого разрыва.

К адаптивной генерации объемной сетки можно также отнести моделирование промышленной теплицы в программном препроцессоре Ansys Meshing [6]. В этой публикации так же, как и в других, демонстрируются принципы локального сгущения КЭ-сетки в нелинейных областях малой размерности с целью повышения адекватности получаемых в результате анализа результатов.

Нередко адаптацию КЭ-сетки необходимо проводить и в процессе моделирования различных контактных взаимодействий упругих и жестких объектов, а также явлений, их сопровождающих. Примеры таких моделей показаны в работах [7–9].

В данном контексте необходимо упомянуть работу [10], объектом исследования которой являлся лабораторный образец, моделирующий реальные отверстия под их механическую обработку режущим инструментом. Элементы сетки вокруг отверстия имеют наименьший размер и существенно меньше переходной зоны, элементы которой, в свою очередь, кратно меньше остальной области КЭ-сетки образца с однородной геометрией. Подобный принцип, но со значительными изменениями и новыми аспектами процесса моделирования используют и авторы настоящей статьи, основное содержание реализации которого будет изложено ниже.

Метод моделирования

Чтобы получить малоразмерный геометрический элемент на простой модели, вначале необходимо в ее трехмерной геометрии один из трех габаритных размеров определить на порядок меньше двух других. Таким геометрическим объектом может быть равносоставленная призма с различным количеством граней относительно малой высоты или цилиндр. Остановимся на втором варианте, так как его геометрию будет определять только диаметр вместо расстояния между противоположными вершинами и серединами противоположных ребер любого поперечного сечения, величины которых имеют отличие. Затем нужно определить малоразмерный геометрический элемент, который будет отличаться уже на два порядка от значения высоты цилиндра. Таким элементом может быть радиусный переход или галтель, расположение которой должно быть максимально близким к оси симметрии объекта, и проходить через одну из его плоскостей. Определенные нами критерии может удовлетворить модель цилиндра относительно небольшой высоты с выборкой в виде V-образного паза, которая должна иметь радиусный переход своих граней, на два порядка меньше размера высоты цилиндра (рис. 1).

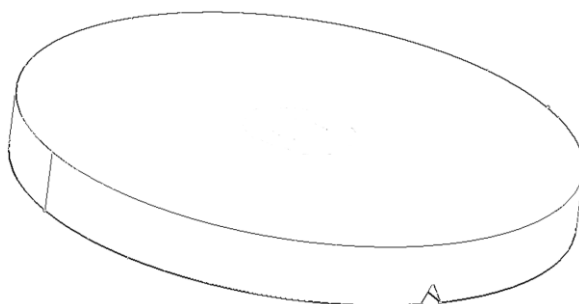


Рис. 1. Общий вид модели с малоразмерным элементом в виде радиусного перехода с вершиной в срединной поверхности

Итак, мы имеем геометрию модели, которая удовлетворяет заданным нами критериям: диаметр – 200 мм; высота – 20 мм, т.е. на один порядок меньше, радиусный переход при вершине сходящихся под 60° граней V-образного паза равен 0,1 мм, что в 200 раз меньше высоты цилиндра и на три порядка меньше его радиуса.

Таким образом, нами определена максимально простая геометрия модели с достаточной степенью разномасштабности для того, чтобы продемонстрировать алгоритм генерации качественной конечно-элементной сетки под решение задачи статического деформирования.

Генерацию КЭ-сетки будем осуществлять в препроцессоре Siemens FEMAP в полуавтоматическом режиме с предварительной фрагментацией геометрии модели.

Таким образом, наша модель имеет две плоскости симметрии, что позволяет рассмотреть лишь ее четверть (рис. 2). Как и авторы работы [10], разделим модель на три фрагмента: зона крупной сетки для основной (геометрически-однородной) части модели **1**, переходная зона с более мелкой сеткой **2** и зона исследования НДС **3** в центре модели с адаптивной мелкой и ультра-мелкой сеткой для адекватного отображения поведения зоны исследования и точки регистрации перемещений и напряжений.

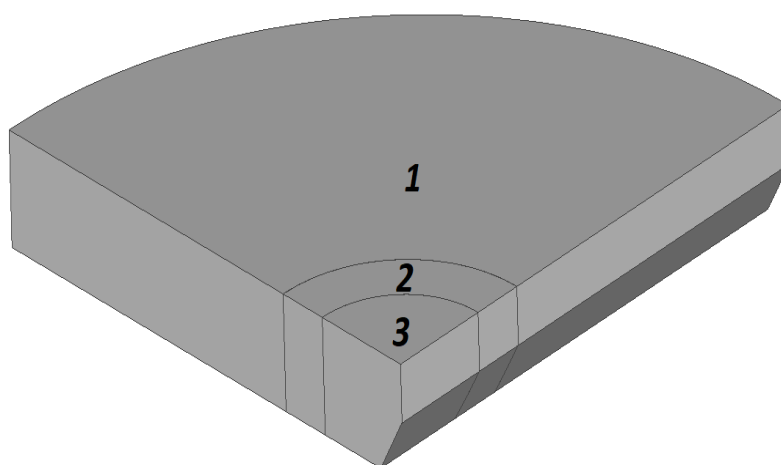


Рис. 2. Четверть общего вида модели, разделенная на фрагменты

Крупная КЭ-сетка для основной части модели 1 с однородной геометрией генерируется посредством опции Mesh / Mesh Control / Size On Solid [11] с последующим выбором соответствующей области формирования сетки и указанием размера элементов в поле Element Size окна Automatic Mesh Sizing (рис. 3). В этой части модели КЭ-сетка имеет равномерную структуру с преимущественным сохранением эквивалентного расстояния между ее соседними узлами. Переходный фрагмент модели также разбивается на сетку с равномерной структурой, но уже более мелкого размера (рис. 4).

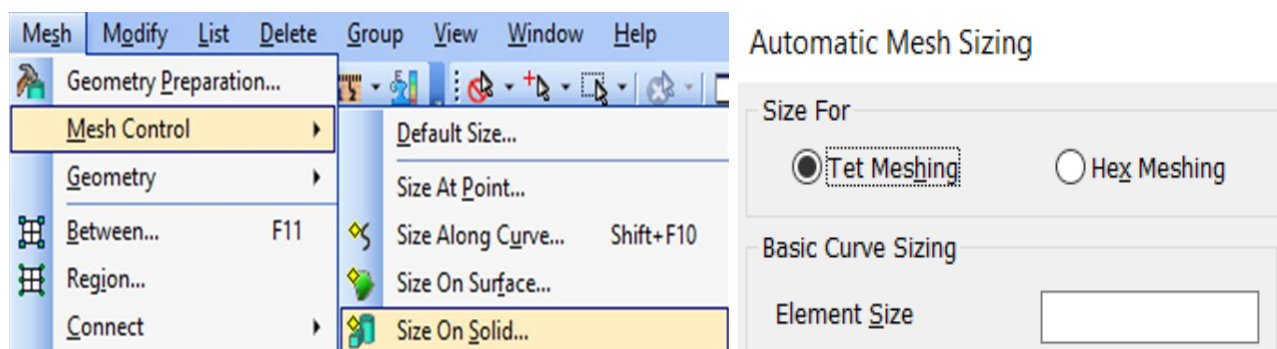


Рис. 3. Область интерфейса с командой определения размеров КЭ-сетки в Siemens FEMAP

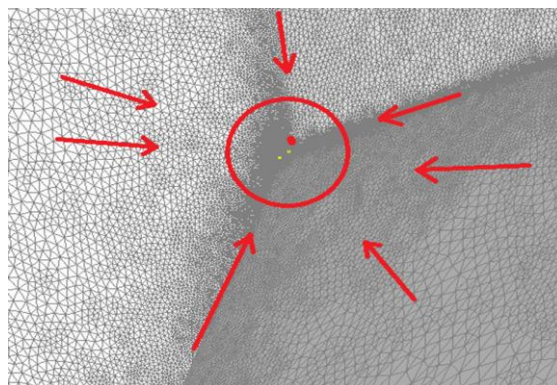


Рис. 4. КЭ-сетка в области вокруг реперной точки

На третьем центральном фрагменте четверти модели генерируется управляемая адаптивная сетка, наименьший размер ячеек которой будет располагаться вокруг точки контроля составляющих компонент напряжений и деформаций. При этом размер элементов сетки постепенно увеличивается по мере удаления от точки контроля во всех направлениях. Получить такого рода сетку можно посредством применения опции *Mesh / Mesh Control / Size Along Curve* (рис. 5) [11]. Она позволит определить оптимальное положение узлов КЭ-сетки на ребрах, образующих центральный фрагмент модели.

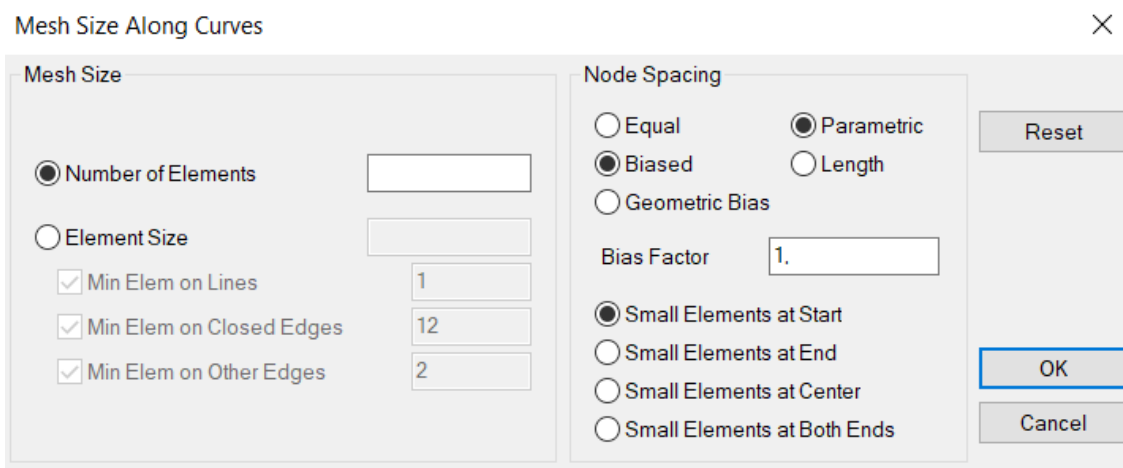


Рис. 5. Окно команды определения размеров между узлами КЭ-сетки объемного объекта, расположенными вдоль его соответствующего ребра

Полученная таким методом КЭ-сетка модели (рис. 6) позволит наиболее точно отобразить результаты в реперной точке с минимальной затратой времени на вычисление.

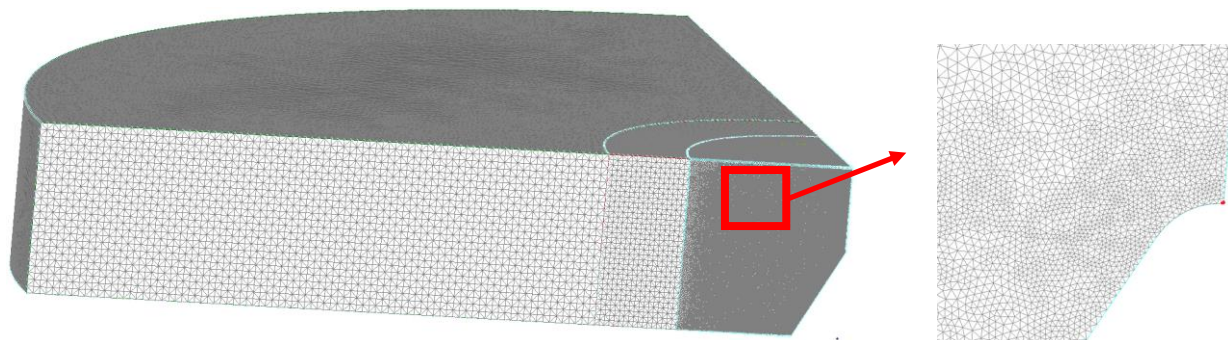
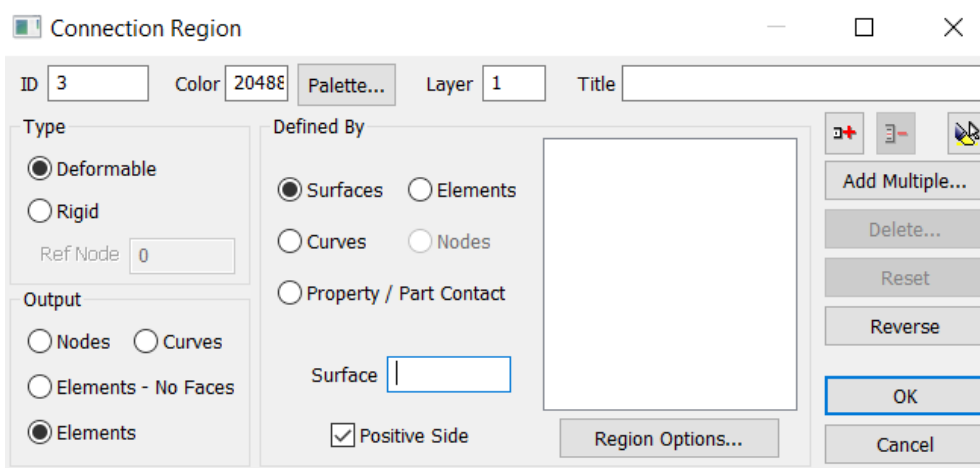


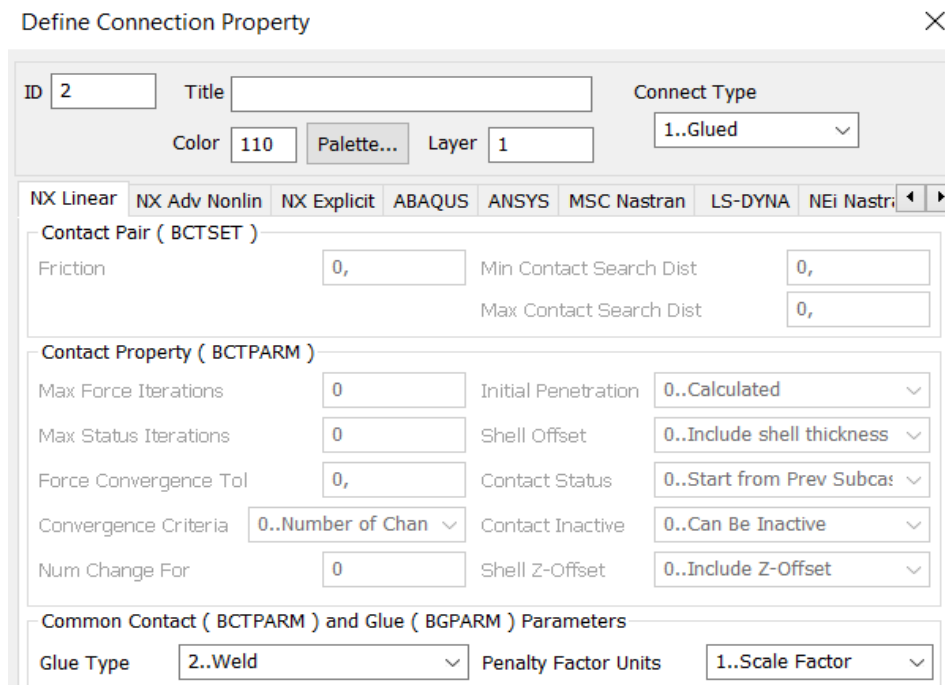
Рис. 6. КЭ-сетка модели, полученная ее управляемой генерацией на каждом из трех фрагментов геометрической модели

Следующим этапом после завершения генерации управляемой и оптимальной для такого класса объектов КЭ-сетки является соединение ее фрагментов воедино. В программном комплексе Siemens FEMAP это может быть реализовано посредством так называемой процедуры «склейки» смежных частей КЭ-сетки между собой без изменения ее топологии при помощи опций *Connect / Connection Region* и *Connect / Connection Property* [11].

Таким образом, окно команды *Connection Region* (рис. 7, а) позволяет определить вид смежных частей, по которым будет происходить объединение фрагментов КЭ-сетки, а также их тип (деформируемый или абсолютно жесткий) и ориентацию. В окне команды *Connection Property* определяется характер соединения фрагментов модели, который зависит от выбранного расчетного ядра («решателя») (рис. 7, б). Для решения нашей задачи – это линейный расчетный алгоритм расчетного ядра NX Linear. Определенный для этого «решателя» тип соединения *Glued* (склейка) может быть представлен как имитация одного из видов сварочного соединения путем активации опции *Weld* в поле *Glue Type*.



а



б

Рис. 7. Окна определения параметров смежных элементов объединяемых в модели фрагментов (а) и типа их соединения (б)

КЭ-сетка определенной нами модели имеет три деформируемых фрагмента с одинаковым модулем упругости, объединение которых осуществляется по смежным контактирующим поверхностям без изменения топологии КЭ-сетки каждого из фрагментов (рис. 8).

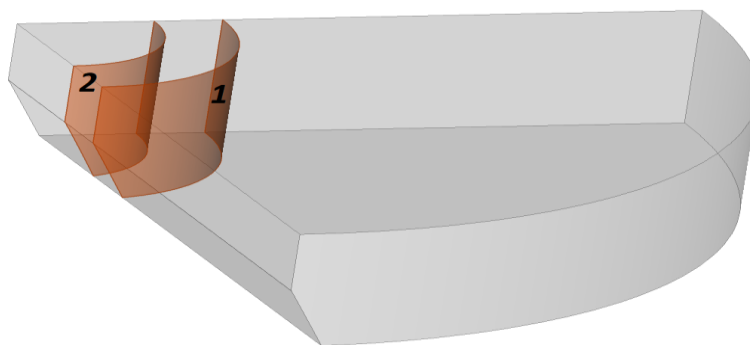


Рис. 8. Схема фрагментов, объединяемых по смежным контактирующим поверхностям 1 и 2

Соответственно топологии полученной КЭ-сетки рассматриваемой модели прикладывается единичная нагрузка в виде давления, равного 1 МПа, к площади круга с центром над реперной точкой. Вектор действия нагрузки перпендикулярен плоскости модели и направлен к ее основанию, как показано на рис. 9.

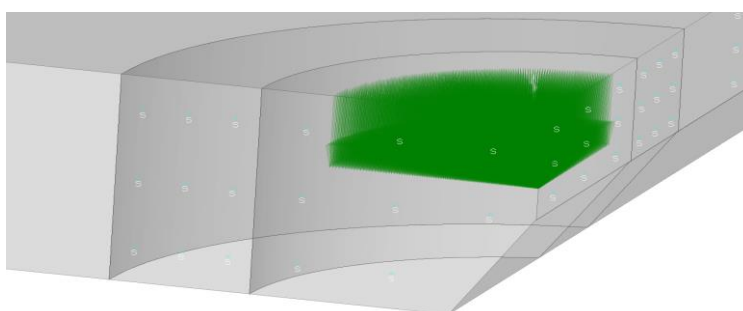


Рис. 9. Вид и позиция прикладываемой нагрузки

Далее в модели определяются граничные условия симметрии на ее плоских боковых гранях (см. рис. 9) и требуемые параметры закрепления. После этого производится анализ модели и регистрация компонент перемещения и напряжений в реперной точке (см. рис. 4).

Таким образом, предложенный в настоящем исследовании метод локальной адаптации КЭ-сетом, генерируемых на моделях с малоразмерными геометрическими элементами, будет полезен в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, когда анализ простой модели необходимо провести с максимальной степенью точности. Его практическая реализация показана на примере разномасштабной геометрической модели с максимальной разницей размеров в три порядка и проведена в препроцессорной среде моделирования Siemens FEMAP. Приведены основные этапы подготовки геометрии модели и генерации конечно-элементной сетки. Наглядно продемонстрирован способ объединения разномасштабных конечно-элементных сеток.

Библиографический список

1. Власов А.Н., Волков-Богородский Д.Б., Знаменский В.В., Мнушкин М.Г. Генерация нерегулярных гексаэдральных сеток // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 78–87.
2. Васева И.А., Лисейкин В.Д. Применение метода конечных элементов для построения адаптивных сеток // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16. № 5. С. 3–15.
3. Охотников Д.И. Прямое численное моделирование ламинарно-турбулентного перехода на сетках с локальным сгущением // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2017. Т. 159. № 2. С. 216–230.
4. Кургузов В.Д. Выбор параметров сетки конечных элементов при моделировании роста трещин гидроразрыва // Вычислительная механика сплошных сред. 2015. Т. 8. № 3. С. 254–263.
5. Du Y., Ma L., Zheng J., Zhang F., Zhang A. Coupled simulation of explosion-driven fracture of cylindrical shell using SPH-FEM method // International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2016. Vol. 139-140. P. 28–35.
6. Троханяк В.І., Куляк Б.В. Достиження процесу генерації 3D-сітки промислової теплиці методом кінцевих елементів в Ansys Meshing // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2016. Т. 3. Вип. 6. 219–227.

7. Жданов А.В., Иванченко А.Б., Новикова Е.А., Шинаков И.В. Определение напряжений и деформаций в контакте звеньев РВМ методом конечных элементов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 12. P. 75–78.

8. Scherzer R., Silbermann C.B., Landgraf R., Ihlemann J. FE-simulation of the Presta joining process for assembled camshafts-modelling of the joining process // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 181. P. 12030.

9. Scherzer R., Fritsch S., Landgraf R., Ihlemann J., Wagner M.F.-X. Finite Element Simulation of the Presta Joining Process for Assembled Camshafts: Application to Aluminum Shafts. Metals. 2018. Vol. 8. P. 128. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8020128>.

10. Blödorn R., Viotti M.R., Bonomo L.A., Schroeter R.B. Calibration Coefficients Determination Through Fem Simulations for the Hole-Drilling Method Considering the Real Hole Geometry // Experimental Techniques. 2017. Vol. 41. № 1. P. 37–44. DOI: 10.1007/s40799-016-0152-3.

11. FEMAP Commands. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.

Сведения об авторах / Information about the Authors

Еловенко Денис Александрович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: elovenko03@gmail.com

Denis A. Elovenko,

Cand. Sci. (Technics), Associate Professor,
Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: elovenko03@gmail.com

Носков Денис Петрович,

студент группы Элбп-16.,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: noskov.deniska@inbox.ru

Denis P. Noskov,

Student ,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: noskov.deniska@inbox.ru

Вальдимат Григорий Игоревич,

студент группы Элбп-16,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: valdimatg@mail.ru

Gregory I. Valdimat,

Student ,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: valdimatg@mail.ru

Сигов Роман Сергеевич,

студент группы Элбп-16.,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: srs98-98@list.ru

Roman S. Sigov

Student ,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: srs98-98@list.ru