

УДК 004.942

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.33.2.026](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.33.2.026)

Специальное программное средство генерации макроэлементов в методе внешних конечноэлементных аппроксимаций

А.С. Троценко¹, А.А. Успехов², М.И. Чижов¹

¹ Воронежский государственный технический университет,
Воронеж, Российская Федерация

² ООО ИНОБИТЕК, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. В современных условиях компьютерные системы инженерного анализа вынуждены работать с постоянно усложняющимися конфигурациями изделий. Наиболее популярный в этой среде метод конечных элементов (МКЭ) позволяет оперативно решать большинство ставящихся перед ним задач. Однако инженерный анализ изделий сложной конфигурации может потребовать либо применения суперкомпьютеров, либо упрощения модели изделия, что значительно повышает трудоемкость процесса. В связи с этим возникает потребность поиска более производительных методов расчета. Одним из таких методов является метод внешних конечноэлементных аппроксимаций (МВКА). Но несмотря на достоинства метода, отсутствие удобных средств препроцессорирования затрудняет использование метода на практике. В данной статье рассмотрено программное средство препроцессора для МВКА, позволяющее генерировать множества макроэлементов (аналог конечных элементов в МКЭ) для трехмерных (3D) моделей изделий. Разработанный препроцессор обеспечивает генерацию множеств макроэлементов различной размерности путем простой настройки точности единственным параметром. Встроенные в препроцессор алгоритмы учета формы 3D моделей повышают регулярность распределения множества макроэлементов. Интерфейс программного средства позволяет использовать его как для решения исследовательских задач, так и в составе потенциальных систем инженерного анализа по МВКА.

Ключевые слова: макроэлемент, 3D модель, компьютерное моделирование, инженерный анализ, МВКА.

Для цитирования: Троценко А.С., Успехов А.А., Чижов М.И. Специальное программное средство генерации макроэлементов в методе внешних конечноэлементных аппроксимаций. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(2). Доступно по: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=994> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.026

The custom software application to generate a set of macroelements for the finite element approximations method

A.S. Trotsenko¹, A.A. Uspehov², M.I. Chizhov¹

¹ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

² INOBITEC LLC, Voronezh, Russian Federation

Abstract. Today the computer systems for engineering analysis are forced to work with ever more complex product configurations. The most popular in this area, the finite element method (FEM), allows solving most of the engineering tasks with good performance. However, the engineering analysis of products with complex configurations may require either using supercomputers or a product model simplification. It significantly increases the labor intensity of the process. In this regard, there is a need to search for more efficient methods. One of them is the external finite element approximation method (EFEAM). Despite the method advantages, the lack of convenient preprocessing tools makes it difficult to use by engineers. In this article, the preprocessor software for EFEAM is considered. It allows

generating the macroelements sets (the same as finite elements in FEM) for product 3D models. The developed preprocessor provides generating of sets of macroelements with various sizes. It is reached by simply adjusting the accuracy with only one parameter. Algorithms built into the preprocessor for tracing the shape of 3D models increase the regularity of many macroelements distribution. The user interface of the developed software allows us to use it both for solving research problems and as part of engineering analysis systems for EFEAM.

Keywords: macroelement, 3D model, computer modeling, engineering analysis, EFEAM

For citation: Trotsenko A.S., Uspehov A.A., Chizhov M.I. The special software application to generate a set of macroelements for the finite element approximations method. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=994> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.026 (In Russ).

Введение

Постоянно растущая сложность проектируемых изделий требует применения высокопроизводительных систем инженерного анализа. Метод конечных элементов (МКЭ) [1] занимает лидирующие позиции в этой области. Однако, несмотря на достоинства современных инструментов на основе МКЭ, в расчетной практике для сокращения времени анализа применяется создание упрощенных версий сложных моделей. Поддержка одновременно двух моделей изделия: конструкторской и расчетной, неизбежно приводит к дополнительным расходам на этапе проектирования. В такой ситуации поиск альтернативных методов инженерного анализа становится актуальной проблемой.

Альтернативой МКЭ выступает метод внешних конечноэлементных аппроксимаций (МВКА) [2], специально разработанный для анализа моделей сложной конфигурации. Опубликованные авторами МВКА данные [3, 4, 5] говорят о значительном преимуществе метода в производительности над МКЭ. Замечено, что чем выше сложность исследуемой модели, тем сильнее выражается преимущество. Главной особенностью МВКА является использование несогласованных конечных элементов – макроэлементов. В отличие от типизированных форм конечного элемента в МКЭ, макроэлемент может иметь произвольную геометрическую форму. В МВКА исходная модель сама по себе рассматривается как макроэлемент, на котором можно выполнить расчет. Идеальной формой макроэлемента считается параллелепипед. Поэтому для повышения точности расчета исходная модель должна быть расчленена на отдельные макроэлементы, форма которых оказывается близкой к форме параллелепипеда.

На сегодняшний день известны два программных средства, реализующие МВКА: Procision [3] и Altair SIMSOLID [6]. В системе Procision разработчикам удалось раскрыть потенциал метода, но отсутствие удобных средств препроцессорирования не позволило конкурировать с системами МКЭ. Пользователь был вынужден вручную, с помощью инструментов системы проектирования, разбивать модель на макроэлементы. В более современной системе SIMSOLID по открытым данным можно сделать вывод, что авторы сделали акцент на сложные сборочные конструкции, где каждый элемент сборки рассматривается как макроэлемент. Таким образом, тема автоматизированного разбиения модели на макроэлементы для МВКА остается не проработана.

Для решения этой проблемы нами был предложен алгоритм автоматизированного разбиения 3D модели на макроэлементы [7]. Алгоритм позволяет генерировать множества макроэлементов, оптимальные в отношении к геометрической форме модели [8]. В целях апробации и отладки разработанных алгоритмов реализовано специальное программное средство. Интерфейс программного средства, помимо решения

исследовательских задач, позволяет использовать его в качестве препроцессора в потенциальной системе компьютерного моделирования по МВКА.

Алгоритм программного средства

Основой программного средства является итерационный рекурсивный алгоритм разбиения модели [7]. В основе алгоритма лежит понятие критерия близости k . Критерий близости отражает близость формы данного макроэлемента m к форме описанного вокруг него минимального по объему параллелепипеда B и рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{V_m}{V_B}, \quad (1)$$

где V_m - объем макроэлемента m , V_B - объем параллелепипеда B и $k \in (0;1]$. Чем ближе форма макроэлемента к параллелепипеду, тем значение k ближе к 1.

Сходимость итерационного процесса обеспечивается условием:

$$\begin{cases} k \geq e, \\ V_m \leq v \end{cases} \quad (2)$$

где e - пороговое значение критерия близости, v – минимальный допустимый объем макроэлемента. Пороговое значение позволяет регулировать количество генерируемых макроэлементов и, соответственно, точность расчета.

На вход алгоритма разбиения подается исследуемая модель, которая рассматривается как макроэлемент - алгоритм не будет разбивать модель на меньшие макроэлементы, если она удовлетворяет пороговому критерию близости. На Рисунке 1 на модели куба продемонстрированы две итерации разбиения. Куб выбран для наглядности демонстрации. В действительности модель такой формы не требует разбиения. На первой итерации исходная модель m_0 разбивается плоскостью на два макроэлемента m_1 и m_2 . На второй итерации макроэлемент m_2 разбивается на два макроэлемента m_3 и m_4 . Получаем результирующее множество макроэлементов $A = [m_1, m_3, m_4]$.

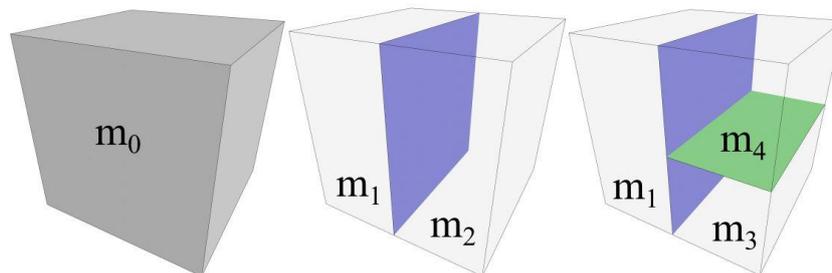


Рисунок 1 – Пример итерационного (слева направо) процесса разбиения модели куба на макроэлементы

Figure 1 – Example of splitting process (from left to right) for a cube model

Исходная модель может быть как фасетной (триангуляционная сетка в файле формата OBJ), так и параметрической (файл формата STEP). Такой набор форматов позволяет использовать препроцессор в широком спектре систем компьютерного моделирования.

В программное средство встроены алгоритмы выявления геометрической симметрии исходной модели и построение объектов привязки [8]. Полученная информация о симметрии и объектах привязки используется для генерации более равномерного распределения [9] макроэлементов по объему исходной модели. Авторами реализовано выявление зеркальной и вращательной симметрий 3D моделей. Плоскости симметрии используются для предварительного разбиения модели перед выполнением основного алгоритма. Для моделей с вращательной симметрией может быть включено разбиение в полярной системе координат (СК), что существенно повышает равномерность распределения макроэлементов [8, 10].

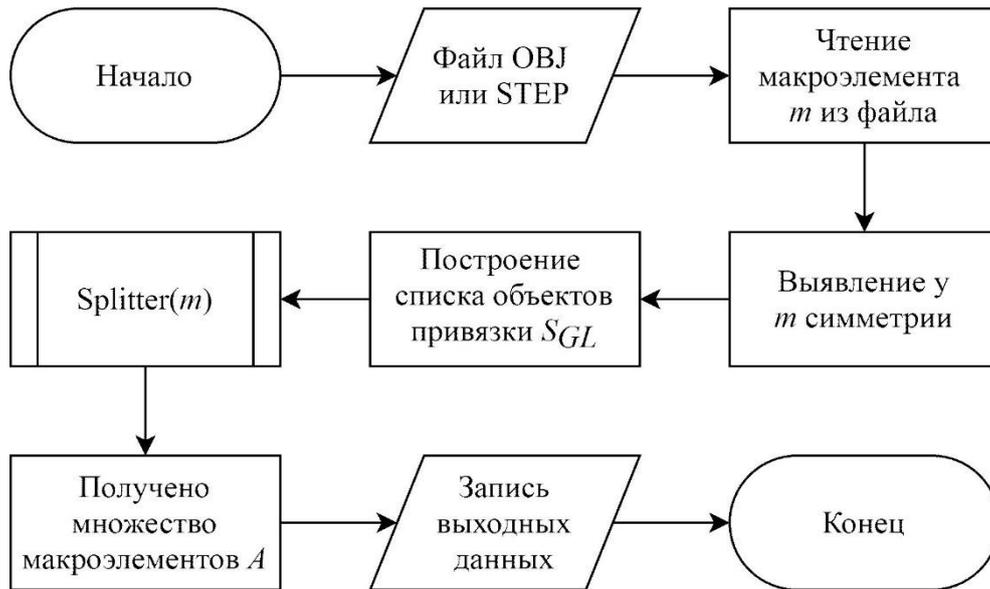


Рисунок 2 – Схема алгоритма программного средства
Figure 2 – Software algorithm diagram

Для разбиения модели на макроэлементы используется ее полигональное представление. Выделение макроэлемента сопровождается добавлением межэлементных граней в структуру исходной полигональной сетки. Межэлементная грань разделяет объем модели на 2 макроэлемента и входит в их структуру без дублирования как общий объект. Результирующая полигональная сетка в конечном итоге получает множество связанных межэлементных граней. Полученные данные записываются в файловую систему. Файлы результата могут быть прочитаны в потенциальной системе инженерного анализа по МВКА.

Схема выходных данных

Организация выходных данных препроцессора должна соответствовать следующим критериям:

- компактность (наименьший размер занимаемой памяти);
- возможность многопроцессорной обработки;
- доступность спецификации формата для сторонних систем.

Выходные данные разработанного препроцессора для множества макроэлементов размера N составляет следующий набор файлов (Рисунок 2): *nod* – координаты узлов полигональной сетки, 1 файл; *por* – индексы узлов полигонов, 1 файл; *ssf* – полигоны межэлементных граней, 1 файл; *ssi* – индексы межэлементных граней для быстрого поиска данных в файле *ssf*, 1 файл; *ele* – описание макроэлемента, N файлов. Бинарный

формат файлов и отсутствие дублирования данных благоприятно сказывается на объеме занимаемой памяти. Рассмотрим подробнее формат.

Файл nod содержит координаты (x, y, z) узлов полигональной сетки, размещенных в виде одномерного массива как $[x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1, \dots, x_n, y_n, z_n]$.

Файл nop содержит индексы узлов полигонов внешней оболочки модели в виде одномерного массива индексов $[i1_0, i2_0, i3_0, i1_1, i2_1, i3_1, \dots, i1_n, i2_n, i3_n]$. Индексы соответствуют порядку узлов в файле nod. В силу особенностей МВКА необходимо разделять полигоны межэлементных граней и полигоны внешней оболочки исходной модели. Поэтому индексы полигонов всех межэлементных граней вынесены в отдельный файл.

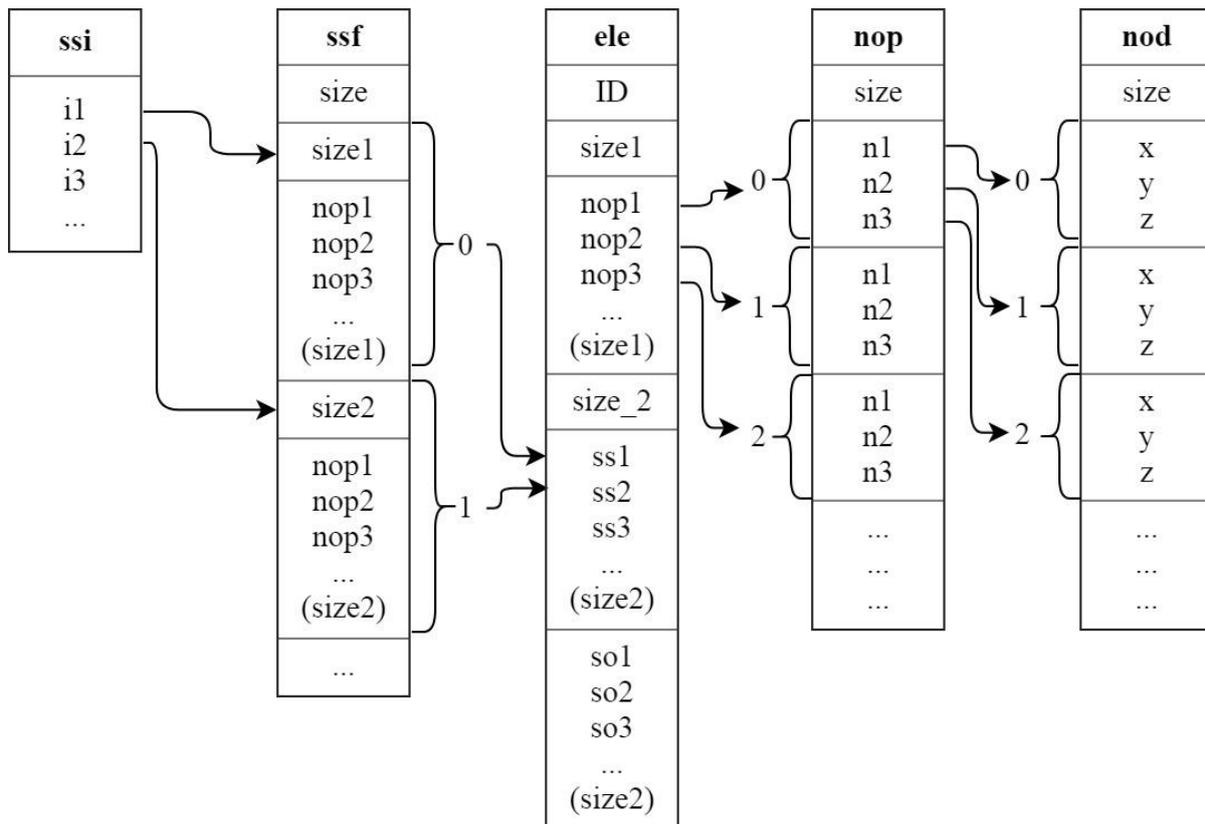


Рисунок 3 – Схема выходных данных
Figure 3 – Output data structure

Файл ssf содержит индексы узлов полигонов для межэлементных граней. Массив индексов аналогичен массиву файла nop, за исключением дополнительного разбиения массива на блоки некоторого размера. Каждый блок соответствует отдельной межэлементной грани.

Файл ele содержит индексы полигонов внешней оболочки исходной модели и порядковые номера межэлементных граней из файла ssf, формирующие макроэлемент. Так как межэлементные грани являются общим ресурсом для соседних макроэлементов, здесь хранится дополнительная информация о положении данного макроэлемента относительно каждой межэлементной грани – с лицевой или обратной стороны.

Для ускорения доступа к данным файл ssi содержит позиции каждой межэлементной грани из файла ssf. Тогда при чтении файла можно будет сразу сдвинуть каретку алгоритма чтения на нужную позицию.

Пользовательский интерфейс программного средства

Взаимодействие пользователя с программным средством реализовано через интерфейс командной строки. Пользователем может выступать как человек, так и стороннее программное средство. Рассмотрим ключевые параметры командной строки в Таблице ниже.

Ключ `-i` определяет путь к файлу исходной модели и выступает обязательным параметром. Для остальных параметров заданы значения по умолчанию. Большинство значений по умолчанию пользователь может изменить в файле настроек программы `settings.xml`, что позволит не вводить одни и те же значения при каждом запуске.

Таблица 1 – Командный интерфейс программного средства

Table 1 – Command line interface of the application

Ключ	Описание
<code>-i</code>	Путь к файлу исходной модели
<code>-e</code>	Точность разбиения
<code>-j</code>	Количество потоков выполнения
<code>--snap_objects</code>	Включить объекты привязки
<code>--symmetry</code>	Включить учет симметрии
<code>--polar_splitter</code>	Включить полярную СК
<code>--confgen</code>	Сгенерировать файл настроек
<code>--conf</code>	Путь к пользовательскому файлу настроек
<code>--help</code>	Вывод справки

На Рисунке 4 показан пример работы программы – вывод в консольное окно. В информационном режиме протоколирования программа выводит данные об установленных параметрах и данных разбиения и ключевые показатели результата: размер множества макроэлементов, количество итераций разбиения и время выполнения. Для исследовательских задач можно включить расширенный режим протоколирования для вывода данных по каждой итерации алгоритма.

```

C:\Qt\Tools\QtCreator\bin\qtcreator_process_stub.exe
INFO: Load settings from settings.xml
2021-05-26 23:15:18 [10668] [INFO] : *****Start*****
23:15:18 [10668] [INFO] : Read STEP file D:\sun\Polycont\doc\splitter3d\storage\models\balance.stp
23:15:18 [10668] [INFO] : The STEP file reading complete
23:15:19 [10668] [INFO] : Base model volume = 229972
23:15:19 [10668] [INFO] : Base model ratio = 0.314999
23:15:19 [10668] [INFO] : BoundingBox max side = 280
23:15:19 [10668] [INFO] : Build a set of split...
23:15:19 [10668] [INFO] : Input split tolerance = 0.4
23:15:19 [10668] [INFO] : Build a set of split completed
23:15:19 [10668] [INFO] : Result:
Amount parts: 2
Runtime (msec): 101
Amount iterations: 1
Idle iterations: 0
23:15:19 [10668] [INFO] : Save result...
23:15:19 [10668] [INFO] : Save result time (msec): 116
23:15:19 [10668] [INFO] : *****Done*****
    
```

Рисунок 4 – Пример консоли вывода программного средства

Figure 4 – Console output example

Результаты

Апробация программного средства выполнялась систематически в процессе разработки. Набор тестовых данных составляет более 100 единиц электронных моделей изделий различной формы и исполнения – от типовых до уникальных.

Отсутствие современных прямых конкурентов препроцессору МВКА затрудняет оценку показателей эффективности программного средства. Ближайший аналог – препроцессор системы Procision, поддержка которого давно прекращена. Однако для визуального сравнения качества множеств макроэлементов показатели Procision считаем приемлемыми. Что касается быстродействия, разработанный препроцессор превосходит своего предшественника Procision на порядки [7]. Такой прирост объясняется высоким уровнем автоматизации этапа препроцессирования. На Рисунке 3 показан пример генерации множества макроэлементов для электронной модели коленчатого вала. По Рисунку видно, что разработанный препроцессор выделил конструктивные элементы модели как отдельные макроэлементы, тем самым получив картину разбиения из 26 макроэлементов за 3 секунды. В Procision идентичную генерацию макроэлементов опытный специалист получает за 20 минут [3].

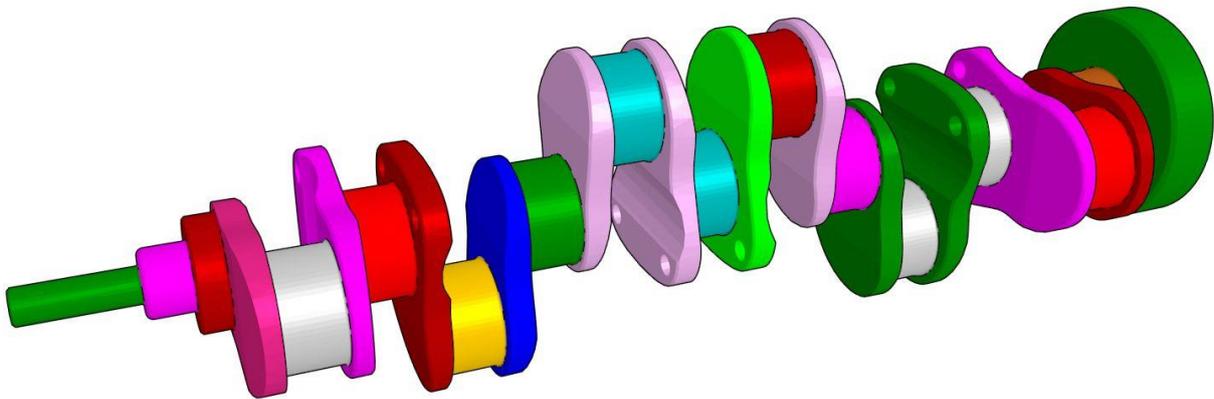


Рисунок 5 – Пример генерации множества макроэлементов для модели коленчатого вала (макроэлементы выделены оттенками цвета)

Figure 5 – Demonstration of macroelements generation result (macroelements are highlighted by colors)

Таблица 2 – Показатели сравнения препроцессоров МВКА и МКЭ
Table 2 – Comparing parameters for EFEAM and FEA preprocessing

№	Метод	Точность	Элементов	Время работы
1	МКЭ	5,44 мм	110433	30 сек
	МВКА	0,4	326	25 сек
2	МКЭ	11,48 мм	77792	20 сек
	МВКА	0,2	160	18 сек
3	МКЭ	3,6 мм	20658	47 сек
	МВКА	0,4	55	7,1 сек

В современных реалиях гораздо более полезной была бы оценка быстродействия разработанного препроцессора МВКА по отношению к препроцессорам МКЭ. Не смотря на разную природу рассматриваемых методов, требовалось достичь близкой производительности препроцессоров: если время работы разработанного препроцессора

МВКА будет соответствовать аналогам из МКЭ, то можно считать его использование целесообразным и выгодным. Наибольшее влияние на время работы препроцессора оказывает установленная точность расчета – чем выше точность, тем больше элементов будет сгенерировано. Поэтому для сравнения препроцессоров МВКА и МКЭ (ANSYS) были выбраны рекомендуемые значения точности. Результаты сравнения времени выполнения (Таблица 2) показали сопоставимую производительность рассматриваемых методов, что доказывает работоспособность разработанного препроцессора.

Заключение

По результатам тестирования препроцессор МВКА превосходит по производительности свой аналог. Разработанное программное средство реализует ключевые особенности систем своего класса:

- Уникальный алгоритм генерации макроэлементов с единственным параметром настройки точности.
- Простой пользовательский интерфейс командной строки, обеспечивающий возможности встраивания программного средства.
- Сопоставимая с МКЭ производительность (в условиях рекомендованной точности препроцессирования).
- Компактный и доступный для понимания формат выходных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. *Мир*. 1975.
2. Апанович В.Н. Метод внешних конечноэлементных аппроксимаций. Минск: *Вышэйш. шк.* 1991.
3. Kurowski P. Say Good-Bye To Defeaturing And Meshing. *Machine Design*. 2000:71-78.
4. Dvorak P. Meshless analysis breaks with FEA traditions. *Machine Design*. 1999:34.
5. Kurowski P. Analysis Tools for Design Engineers. *Society of Automotive Engineers*. 2001.
6. McLeod M. Meshless FEA. *Design Engineering*. October, 2016:26-30.
7. Чижов М.И., Успехов А.А., Троценко А.С. Автоматизированное разбиение 3D моделей в методе внешних конечноэлементных аппроксимаций. *Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: матер. II междунар. НПК, в 2 т. под общ. ред. В. А. Немтинова*. 2016;1:211-216.
8. Троценко А.С., Чижов М.И., Успехов А.А. Подготовка сетки макроэлементов с учетом формы тел в методе внешних конечноэлементных аппроксимаций. *САПР и моделирование в современной электронике: матер. II междунар. НПК, под общ. ред. Л.А. Потапова*, 2018;1:235-239.
9. Diskin B, Thomas L.J. Effects of mesh regularity on accuracy of finite-volume schemes. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2012.
10. Mikhail Chizhov, Andrei Uspehov, Alexander Trotsenko. Splitting Features of Rotation Shapes in the External Finite-Element Approximations Method. *Young Scientist's International Workshop on Trends in Information Processing / CEUR Workshop proceedings*. 2017;1837:38-44.

REFERENCES

1. Zenkevich O.S. Metod konechnyih elementov v tehnikе. *Mir*. 1975.
2. Apanovich Victor. External Finite Element Approximation Method. *Vyshehish. shk.* 1991.
3. Kurowski P. Say Good-Bye To Defeaturing And Meshing. *Machine Design*. 2000:71-78.
4. Dvorak P. Meshless analysis breaks with FEA traditions. *Machine Design*. 1999:34.

5. Kurowski P. Analysis Tools for Design Engineers. *Society of Automotive Engineers*. 2001.
6. McLeod M. Meshless FEA. *Design Engineering*. October, 2016:26-30.
7. Chizhov M.I., Uspehov A.A., Trotsenko A.S. Automated splitting of 3D models for the external finite elements approximations method. *Virtual simulation, prototyping and industrial design*, 2016;1:211-216.
8. Trotsenko A.S., Chizhov M.I., Uspehov A.A. Podgotovka setki makroelementov s uchetom formy tel v metode vneshnikh konechnoelementnykh approksimatsii. SAPR i modelirovanie v sovremennoi ehlektronike: mater. II mezhdunar. NPK, pod obshch. red. L.A. Potapova, 2018;1:235-239.
9. Diskin B, Thomas L.J. Effects of mesh regularity on accuracy of finite-volume schemes. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2012.
10. Mikhail Chizhov, Andrei Uspehov, Alexander Trotsenko. Splitting Features of Rotation Shapes in the External Finite-Element Approximations Method. *Young Scientist's International Workshop on Trends in Information Processing / CEUR Workshop proceedings*. 2017;1837:38-44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Троценко Александр Сергеевич, ассистент, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: trotsenko93@mail.ru

Alexander S. Trotsenko, Assistant of Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation.

Успехов Андрей Александрович, генеральный директор, ООО ИНОБИТЕК, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: auspehov@inobitec.com

Andrei A. Uspehov, CEO of Inobitec LLC, Voronezh, Russian Federation.

Чижов Михаил Иванович; доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Компьютерных интеллектуальных технологий проектирования, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: mihailc@list.ru

Mikhail I. Chizhov, Doctor of Technical Science, Professor of Voronezh State Technical University, head of department of computer intellectual technologies of design, Voronezh, Russian Federation.