

НАПРАСНИКОВ В.В., КОВАЛЕВА И.Л., ПОЛОЗКОВ Ю.В., БОРОДУЛЯ А.В., КУНКЕВИЧ Д.П.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПОДОШВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЧЕЙСТЫХ ОБЪЕКТОВ

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Одним из возможных подходов при формировании оптимизационной модели подошвы является использование ячеистых объектов. При этом актуальным является вопрос построения геометрических моделей таких объектов. Приводятся фрагменты кода и результаты построения для одного варианта геометрии на языке IronPython в среде SpaceClaim для решения такой задачи. Описывается возможный подход к решению задачи по формированию граничных условий, изменяющихся во времени и пространстве.

Ключевые слова: метрическая модель, язык IronPython, переменные граничные условия

Введение

В настоящее время при изготовлении спортивной обуви все чаще используют подошвы облегченного типа (URL:<https://multitool.by/odezhda-obuv/obuv/>, URL:<https://getsiz.ru/tekhnologii-i-konstrukcii-zashchitnoj-obuvi>). Оказывается, что такие ячеистые конструкции имеют дополнительные преимущества.

При этом отмечается, например, что сапоги для экипировки рыбака, изготовленные из эластичного ячеистого материала, имеют следующие преимущества:

- сохраняют гибкость на морозе;
- структура материала делает сапоги легкими и сохраняющими тепло;
- ячеистые подошвы отводят влагу.

Для новинки немецкой компании, представленная в мае 2021 года, используется технология формования облегченной подошвы *Stuco Air Tubeless*. Вид подобных изделий представлен на рисунке 1.



Рисунок 1. Примеры подошв ячеистой структуры

Проектировщики указывают, что при этом:

- снижение материалоемкости конструкции подошвы делает ее дешевле;

- упрощается утилизация, значение которой в европейских странах возрастает с каждым годом;

- воздушные камеры в подошве являются отличным теплоизолятором, и обеспечивают возможность дополнительной вентиляции;

- за счет воздушных камер удастся достичь снижения нагрузок, передаваемых на подошву, на 30 %. Это благотворно сказывается на здоровье суставов ног, и может оказать положительное влияние на профилактику заболеваний позвоночника и других профессиональных заболеваний.

Следует иметь в виду, что снижение материалоемкости изделия приемлемо только при сохранении требований прочности и жесткости [1-7]. Другой особенностью данных изделий является то, что при рассмотрении задачи об определении напряженно-деформированного состояния подошвы обуви нагрузка со стороны стопы изменяется как в пространстве, так и во времени.

Таким образом последовательность этапов при проектировании таких изделий может быть следующей.

- создание параметрической геометрической модели объекта с использованием современной САД-системы.

- формирование граничных условий, изменяющихся как в пространстве, так и во времени.

- выполнение вариантных расчетов и отладка конечно-элементной модели с использованием современной САЕ-системы.

- выполнение оптимизационных вычислений с целью получения рациональных параметров проекта по заданным критериям.

Рассмотрим некоторые из них для рассматриваемого примера.

Создание параметрической геометрической модели объекта на основе сценариев на языке IronPython в среде SpaceClaim

Поскольку для создания конечно-элементной модели в дальнейшем предполагается использовать CAE ANSYS, то рассмотрим два подхода к созданию геометрической части модели, использующие *Design Modeler* и *SpaceClaim*. Сравнительные характеристики этих средств представлены на рисунке 2.

Поскольку *SpaceClaim* предоставляет универсальную возможность создания программ в виде сценариев на языке *IronPython*, будем использовать именно это средство построения.

На рисунке 3 показаны фрагменты сценария на языке *IronPython* с комментариями, запуск которого обеспечивает выполнение нужных операций по построению геометрии объекта.



В качестве примера использования такого подхода приведем задачу разделения исходного тела с помощью «фрезы», представленную на рисунке 4 слева. Здесь исходное тело имеет коричневый цвет, а тело «фреза» зеленый.

Контур проекции основного тела предварительно строится по замеренным точкам с помощью

сплайна, затем контур заполняется и вытягивается. Отдельный резец «фрезы» представляет собой в данном варианте тело, получаемое вытягиванием задаваемого предварительно сечения вдоль винтовой кривой, которая строится с помощью другого сплайна. Варьируя видом сечения резца, можно изменять материалоемкость изделия, а при заданном виде сечения того же можно добиться за счет изменения его параметров.

Особенностью предлагаемого алгоритма является то, что при построении «фрезы» необходимо объединить все резцы с предварительно созданным вспомогательным объектом для образования единого тела. В рассматриваемом варианте сечение резца принято в виде круга, радиус которого можно параметризовать, а в качестве вспомогательного объекта использован параллелепипед, проекция которого включает в себя проекцию подошвы.

Это связано с особенностью инструмента, используемого для разделения тела с целью получения ячеистой структуры. Если попытаться выполнить такое разделение предварительно созданным массивом резцов без указанного объединения, то операция выполняется некорректно и прерывается при достижении зуба, не пересекающегося с основным телом. При этом выполнение программы прерывается.

Parametric modeling (feature-based, history-based)	VS	Direct modeling (explicit modeling)
 <p>Design Modeler Компас, SolidWorks, CATIA, NX, Creo Parametric</p> <ul style="list-style-type: none"> Сохранение информации о последовательности операций. Простота параметризации. 	<p>Ansys Другие примеры</p> <p>Плюсы</p> <p>Минусы</p>	<p>SpaceClaim SolidEdge, Creo Direct, Creo Elements</p> <ul style="list-style-type: none"> Простота изменения модели, в том числе импортированной. Быстрее получаем результат и быстрее проходим обучение. <p>Сложность параметризации. Ограниченность возврата по истории построения.</p> 

Три варианта параметризации в SpaceClaim

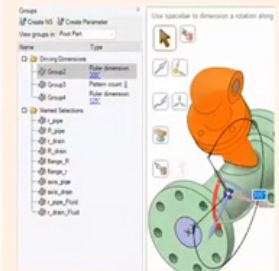
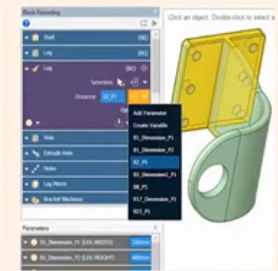
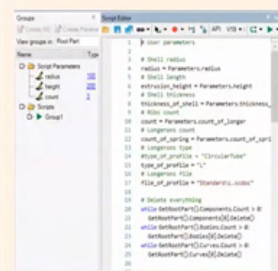
Groups	Block Recording	Scripting
<p>Простая (но не очень мощная) параметризация в рамках прямого моделирования</p> 	<p>Аналог привычного многим инженерам дерева построения прямо внутри SpaceClaim</p> 	<p>Сложный вариант с максимальными возможностями, но нужно писать код на Python</p> 

Рисунок 2. Сравнительные характеристики *Design Modeler* и *SpaceClaim*

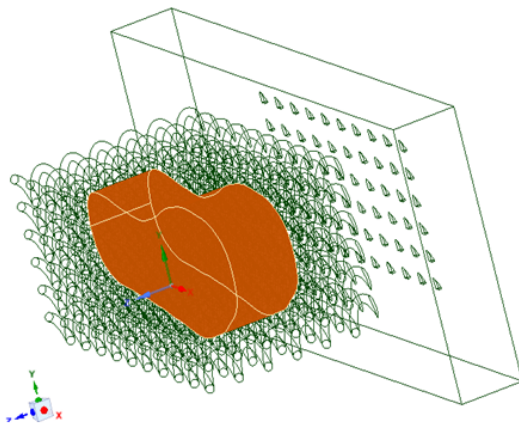
```

1 # Python Script, API Version = V17
2
3 document = DocumentHelper.CreateNewDocument()
4
5 import math
6
7 def funcWINT(R,H_angle, H,K_point):
8     #___ Создаем пустой набор точек с именем ptList
9     ptList = List[Point]()
10    #___ Добавляем точки в набор ptList
11    for i in range(0, K_point):
12        ALFA=H_angle*i;
13        x1=MM(R*math.cos(ALFA));
14        y1=MM(R*math.sin(ALFA));
15        z1=MM(i*H)
16
17        ptList.Add(Point.Create(x1, y1, z1))
18    ncurve = NurbsCurve.CreateThroughPoints(False, ptList, 0.0001)
19    curveSegment = CurveSegment.Create(ncurve)
20    designCurve = DesignCurve.Create(GetRootPart(), curveSegment)
21    #_____ Сплайн построен
22    return ptList
23
219 # Объединить объекты
220
221 for i in range(1, Count_Comp_in_massiv+1):
222     print ' i=', i
223     telo1=GetRootPart().Bodies[1]
224     # Ниже индекс 0 в Components[0] потому,
225     #что объединенное тело telo2 удалится после объединения!!!
226     telo2=GetRootPart().Components[2].Components[0].Content.Bodies[0]
227     targets = Selection.Create([telo1,telo2])
228     result = Combine.Merge(targets, None)
229     # EndBlock
230
231
232 # Переименовать "Твердое тело" в "FREZA"
233 selection = Selection.Create(GetRootPart().Bodies[1])
234 result = RenameObject.Execute(selection,"FREZA")
235 # EndBlock
236
237
238 # Создать пересечение объектов
239 targets = Selection.Create(GetRootPart().Bodies[2])
240 tools = Selection.Create(GetRootPart().Bodies[1])
241 options = MakeSolidsOptions()
242 options.KeepCutter = False
243 result = Combine.Intersect(targets, tools, options, None)
244 # EndBlock

```

Рисунок 3. Фрагменты сценария на языке *IronPython*

Обратим внимание, что предложенный сценарий может быть легко модифицирован для другого основного тела и другого вида отдельного резца «фрезы».



На рисунке 4 справа представлен результат выполнения сценария для одного из возможных случаев основного тела и резца «фрезы».

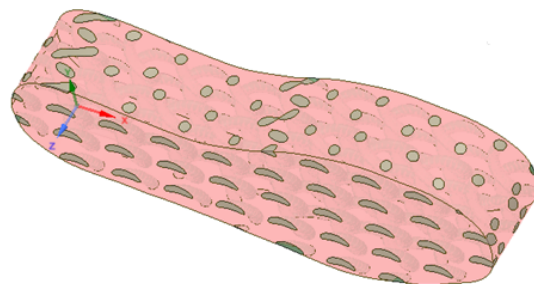


Рисунок 4. Исходное тело и «фреза» (слева) и результат выполнения сценария (справа)

Таким образом в результате выполненных работ на этом этапе

- обоснован выбор современного геометрического моделиера *SpaceClaim*, который может работать как из-под *Ansys Workbench*, так и автономно;
- разработан алгоритм и получена его реализация в виде сценария на языке *IronPython* для параметрического моделирования ячеистого тела;
- получены результаты моделирования для реального объекта.

Формирование граничных условий и выполнение вариантных расчетов

Существующие подходы к формированию граничных условий, изменяющихся во времени и пространстве, имеют недостатки, связанные с тем,

что законы нагружения представляются в непривычной для инженера форме и их графическая визуализация затруднена.

Альтернативой может быть подход на основе использования средства *MATHCAD*. При этом указанные выше недостатки обойдены.

На рисунке 5 представлены фрагменты документа *MATHCAD*, предназначенного для описания закона нагружения, визуализации этого закона и формирования файла, пригодного для импортирования в *ANSYS Workbench*.

Результаты расчета деформированного состояния подошвы, полученные для второго и пятого момента времени с использованием излагаемого подхода, представлены на рисунке 6.

Графики изменения во времени вычисляемых величин представлены на рисунке 7.

ПРИМЕР Функций при фиксированной ОРДИНАТЕ и АППЛИКАТЕ

$$Ft(x, Dxt, t) := \begin{cases} rez1 \leftarrow \sin \left[\pi \cdot \left(\frac{x + Dxt_t}{x_{max}} \right) \right] \\ r \leftarrow rez1 \text{ if } rez1 > 0 \\ r \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{cases}$$

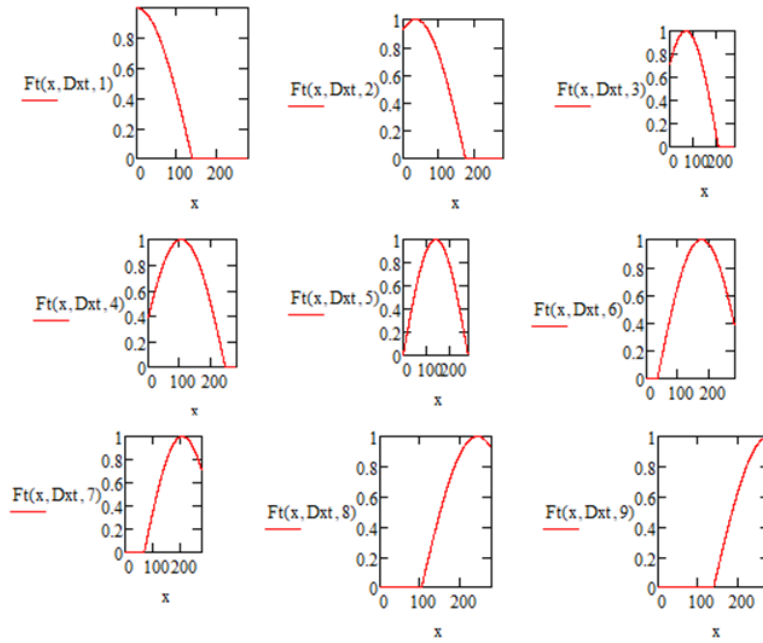


Рисунок 5. Фрагменты документа *MATHCAD*. Изменение нагрузки во времени для первых трех моментов нагружения

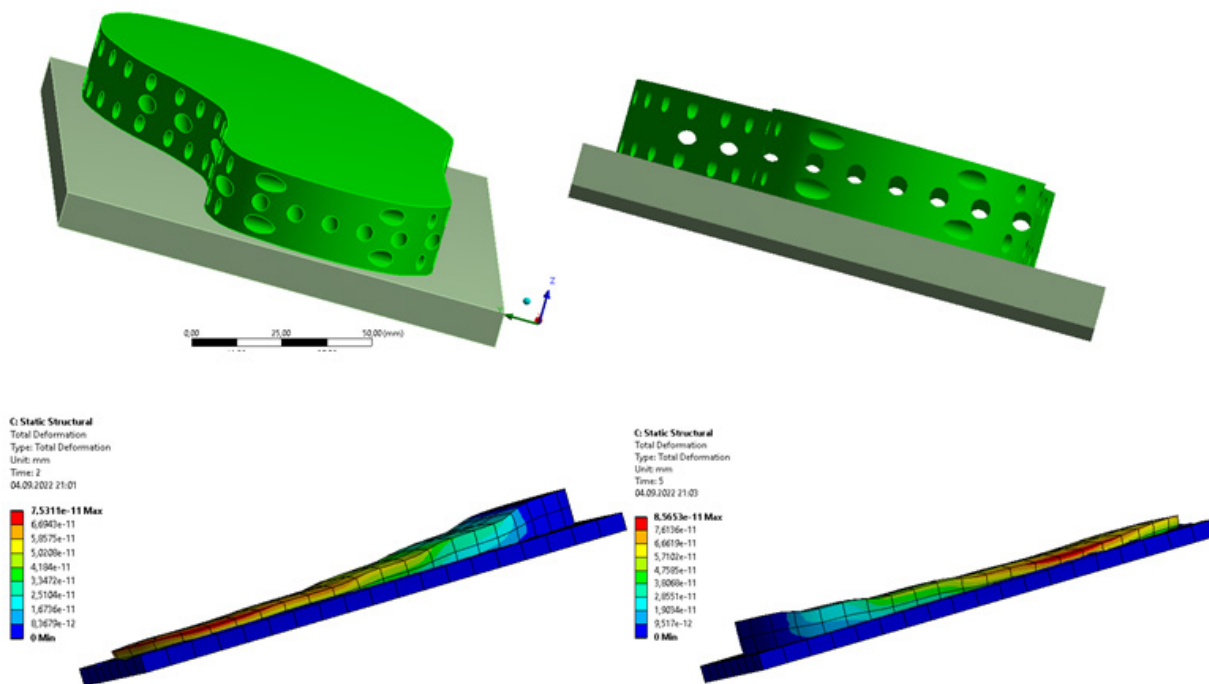


Рисунок 6. Результаты расчета деформированного состояния подошвы

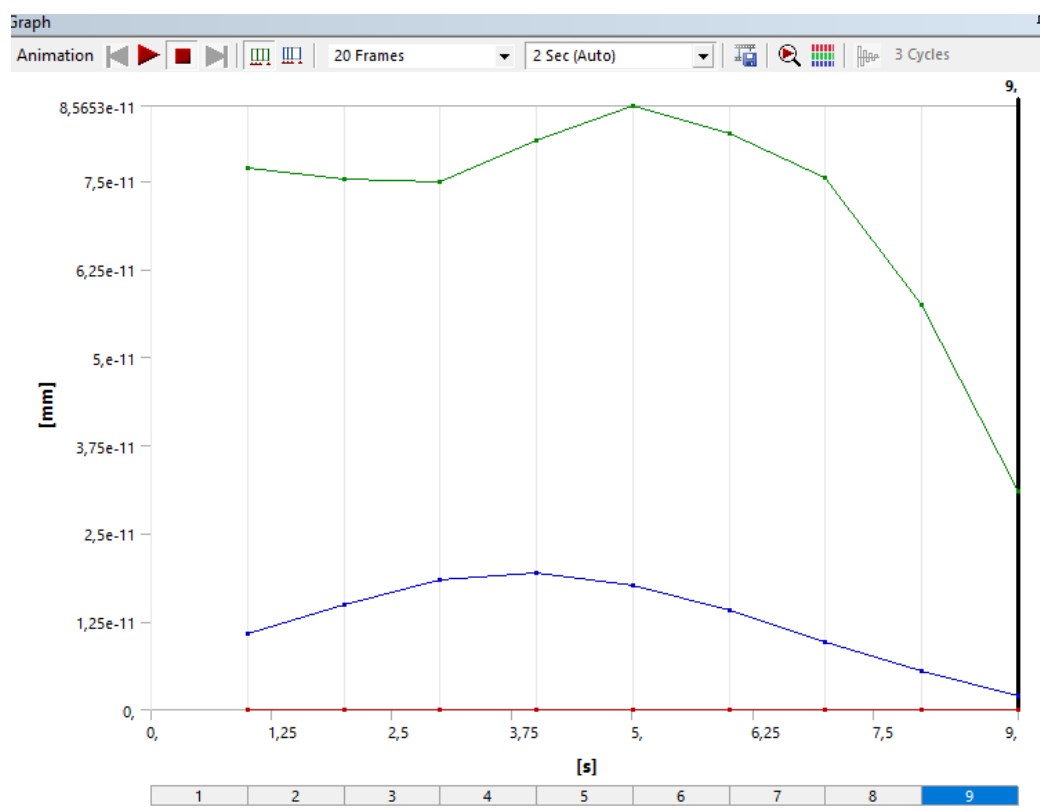


Рисунок 7. Графики изменения во времени вычисляемых величин

Заключение

При реализации данного проекта установлено, что:

- при подготовке геометрической компоненты конечно-элементных моделей предпочтительно для описания этих компонент использовать встроенные языки пакетов. Это позволяет полностью управлять моделью при вариантных расчетах и оптимизационных вычислениях;
- создана модель изделия с периодическим заполнением на основе сценария на языке *IronPython*;

– описан подход на основе использования средства *MATHCAD* для формирования граничных условий, изменяющихся во времени и пространстве;

– с использованием излагаемого подхода выполнены вариантные расчеты деформированного состояния подошвы;

– полученная параметрическая модель может быть использована для выполнения оптимизационных расчетов с целью выбора рационального варианта проекта изделия.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Напрасников В.В.** Подготовка данных о внешних нагрузках в задачах с изменяющимися граничными условиями для деталей с ячеистыми структурами / В.В. Напрасников [и др.] // Математические методы в технологиях и технике. – 2022. – № 12. – Ч. 1. – С. 22-28. DOI: 10.52348/2712-8873_ММТТ_2022_12_22
2. **Напрасников В.В.** Построение геометрической части конечно-элементной модели одного вида пористых структур / В.В. Напрасников [и др.] // Системный анализ и прикладная информатика, 2019. – № 4. – С. 55-61. DOI: 10.21122/2309-4923-2019-4-55-61
3. **Красновская С.В., Напрасников В.В.** Исследование возможности идентификации прижимных усилий крепежных конструкций с использованием нейронных сетей на основе конечно-элементной модели компрессорно-конденсаторной установки / С.В. Красновская, В.В. Напрасников // Информатика. – 2017. – № 4. – С. 92-99.
4. **Красновская С.В., Напрасников В.В.** Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов / С.В. Красновская, В.В. Напрасников // Весці нацыянальнай акадэмп навук беларусі. – 2016. – № 2, серыя фізика-тэхнічных навук. – С. 92-99.
5. **Напрасников В.В., Красновская С.В.** Влияние упрощающих предположений в конечно-элементных моделях компрессорно-конденсаторных агрегатов на спектр собственных частот / С.В. Красновская, В.В. Напрасников // Системный анализ и прикладная математика, 2014. – № 1-3. – С. 51-55.

6. **Полозков Ю.В.** Проблемы проектирования и формообразования легковесных деталей в аддитивном производстве. Сборник трудов международной научной конференции / Ю.В. Полозков // Математические методы в технике и технологиях, 2017. – Т. 10. – С. 61-65.

7. Бородуля А.В. APDL-моделирование ячеистых конструктивных элементов деталей для аддитивного формообразования / А.В. Бородуля [и др.] // Материалы НТК "Аддитивные технологии, материалы и конструкции", Гродно, 5-6 октября, 2016. – С. 146-152.

8. **Huei-Huang, L.** Finite elements simulations with ANSYS Workbench 14 / L. Huei-Huang // Kansas : SDC, 2012. – 602 p.

9. **Free Engineering Simulation Software for Students** // ANSYS Inc., 2016. [Electronic resource]. – Режим доступа: URL: <http://www.ansys.com/products/academic> (accessed: 30.10.2016).

10. **Python 2.7.13 documentation** // PythonSoftwareFoundation, 2016. [Electronic resource]. – Режим доступа: URL: <https://docs.python.org/2/> (accessed: 30.10.2016).

REFERENCES

1. **Naprasnikov V.V., Polozkov YU.V., Kunkevich D.P., Van Czy ZHuj, Solov'ev A.N.** Preparation of data on external loads in problems with changing boundary conditions for parts with cellular structures. *Mathematical methods in technology and engineering*, 2022, no. 12, Part 1, pp. 22-28. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_12_22

2. **Naprasnikov V.B., Polozkov YU.V., Borodulya A.V., Kunkevich D.P.** Building a geometric part finite element model of one kind of porous structures. «Sistemnyj analiz i prikladnaya informatika», 2019;(4):55-61. DOI: 10.21122/2309-4923-2019-4-55-61

3. **Krasnovskaja S.V., Naprasnikov V.V.** Investigation of the possibility of identifying the clamping forces of structural fasteners using neural networks based on a finite element model of a compressor-condenser installation. "Informatics", 2017, no. 4, pp. 92-99.

4. **Krasnovskaja S.V., Naprasnikov V.V.** An overview of the possibilities of optimization algorithms for modeling the designs of compressor-condenser units by the finite element method. *News of National Academy of Sciences Belarus*, 2016, no. 2, pp. 92-99.

5. **Naprasnikov V.V., Krasnovskaja S.V.** Simplifying assumptions of condensing unit finite-element model and their influence on natural frequency spectrum. "Sistemnyj analiz i prikladnaya matematika", 2014, no. 1-3, pp. 51-55.

6. **Polozkov Ju.V.** Problems of designing and shaping lightweight parts in additive manufacturing. *Proceedings of the International Scientific Conference "Mathematical methods in Engineering and Technology"*, 2017, vol. 10, pp. 61-65.

7. **Borodulja A.V., Kunkevich D.P., Naprasnikov V.V., Polozkov Ju.V.** APDL-modeling of cellular structural elements of parts for additive shaping. *Materials of NTC "Additive technologies, materials and constructions"*, Grodno, 5-6 october, 2016, pp. 146-152.

8. **Huei-Huang, L.** Finite elements simulations with ANSYS Workbench 14. Kansas: SDC, 2012, 602 p.

9. **Free Engineering Simulation Software for Students** [Electronic resource] // ANSYS Inc., 2016. URL: <http://www.ansys.com/products/academic> (accessed: 30.10.2016).

10. **Python 2.7.13 documentation** // Python Software Foundation, 2016. URL: <https://docs.python.org/2/> (accessed: 30.10.2016).

NAPRASNIKOV V.V., KOVALEVA I.L., POLOZKOV Y.V., KUNKEVICH D., BORODULYA A.

FINITE-ELEMENT MODEL OF A SOLE WITH THE USING OF CELLULAR OBJECTS

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

One of the possible approaches to the formation of the optimization model of the underlay is the use of cellular objects. At the same time, the question of constructing geometric models of such objects is relevant. Code fragments and construction results for one variant of geometry in IronPython language in SpaceClaim environment to solve such a problem are given. A possible approach to solving the problem of forming boundary conditions changing in time and space is described.

Keywords: *geometric model, IronPython language, variable boundary conditions*



Напрасников Владимир Владимирович – к.т.н., доцент кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – конечно-элементное моделирование, компьютерные средства инженерного анализа технических систем.

Naprasnikov Vladimir Vladimirovich, PhD, associate Professor of the Software Department of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on finit-element computer aided engineering.

E-mail: vnaprasnikov@bntu.by



Ковалева Ирина Львовна – к.т.н., доцент кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы - методы и алгоритмы оптимизации технических систем, машинное обучение, распознавание образов.

Irina L.Kovaleva, PhD, associate Professor of the Department of Software for Information technologies and systems of the Belarusian National Technical University. Her research interests focus on methods and algorithms of optimization and decision-making, pattern recognition and machine learning.

E-mail: ilkovaleva@bntu.by



Полозков Юрий Владимирович – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – автоматизация проектирования объектов и процессов аддитивного производства, оцифровка описаний поверхностей объектов, информационные технологии в образовании.

Polozkov Yury Vladimirovich, PhD, head of the Department of Software for Information technologies and systems of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on computer aided design and engineering of the objects of additive production, surfaces digitization, information technologies in the education.

E-mail: polozkov_yury@mail.ru



Кункевич Дмитрий Петрович, к.т.н., доцент кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – автоматизация конструкторско-технологического проектирования и инженерного анализа механических систем.

Kunkevich Dmitry, PhD, associate Professor of the Software Department of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on computer aided design and engineering of mechanical systems.

E-mail: kunkevichd@gmail.com



Бородуля Алексей Валентинович, к.т.н., доцент кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – CALS – технологии.

Borodulya Aleksei, PhD, associate Professor of the Software for Information technologies and systems Department of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on CALS-technologies.

E-mail: alexius_@msn.com