

УДК 518.5.001.57

В.С. Шевцова, М.С. Шевцова, А.Н. Соловьев

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ КРЫЛА ЛЕТАЮЩЕГО НАСЕКОМОГО
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SIMP - МЕТОДА***

Задача оптимизации топологии несущей конструкции рассмотрена на примере крыла летающего насекомого - конструкции, оптимизированной в результате естественной эволюции. В работе представлены подходы к моделированию аэромеханики и механики крыльев насекомых, к решению задач оптимизации топологии конструкций с использованием современных систем конечно-элементного моделирования и многокритериальной оптимизации. Приведены постановка и результаты решения задачи структурной оптимизации крыла с использованием SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) метода.

Структурная оптимизация; крыло насекомого; генетический алгоритм; метод конечных элементов.

V.S. Shevtsova, M.S. Shevtsova, A.N. Soloviev

**TOPOLOGY OPTIMIZATION OF A FLYING INSECTS WING
USING SIMP- METHOD**

A problem of a carrying structure topology optimization is considered on example of a flying insect wing, that optimized during the natural evolution. New approaches to modeling of aeromechanics and mechanics of the insect wings, and to solving of structural topology optimization using the modern finite element software are presented. The statement and some results of structural optimization problem the for wing obtained by Solid Isotropic Material with Penalization-method are given and discussed.

Structural optimization; insect wing; genetic algorithm; finite-element method.

1. Модели крыла летающих насекомых. Биомимикрия и задача структурной оптимизации. Интерес инженеров к заимствованию идей из природы привел к появлению новой дисциплины *бионики* или *биомимикрии*, а воплощенные в технических устройствах принципы строения живых организмов были названы *биомиметиками* [1]. Одной из причин ускорения развития бионики стали значительные изменения, произошедшие в механике материалов, химии, молекулярной биологии, позволившие, в частности, создавать микроэлектромеханические устройства (MEMs) [2], интегрированные цепи которых участвуют в создании smart материалов или имитируют движение, поведение и познавательную деятельность животных. С другой стороны, развитие бионики дает возможность узнать подробнее о строении и функционировании живых организмов [3]. Областью, в которой заимствование идей из природы представлено особенно ярко, является создание малых беспилотных летательных объектов (MAVs – micro air vehicles и UAVs – unmanned air vehicles), предназначенных для осуществления разведки (слежения) в замкнутых пространствах.

Успешное проектирование MAV требует всестороннего понимания полета и строения крылового аппарата насекомых, так как они обладают набором качеств, необходимых для разрабатываемых искусственных объектов (малые затраты энергии, высокая маневренность, способность к зависанию на месте и др.) [4, 5]. Полет насекомых отличается исключительной маневренностью, которая возможна лишь при очень быстрой и точно скоординированной работе рецепторного и летатель-

* Работа выполнена в рамках и при финансовой поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009 - 2013 годы.

ного аппарата. Во время полета насекомые активно меняют геометрию аэродинамической поверхности крыла. Эффективная аэродинамическая поверхность создается за счет изменения ориентации передней кромки с помощью летательной мускулатуры. Поворачивая крыло, насекомое меняет его угол атаки. В результате при разных положениях крыла генерируются подъемная сила (максимум – при ударе крыла вниз) и тяга (в средней фазе каждого удара), эффекты которых суммируются в полете [6-8]. Другим источником мотивации к изучению структуры и механики крыльев насекомых является тот факт, что их крылья представляют собой продукт многотысячелетней эволюции, которая создала их структуру, оптимальной для данных способов и режимов полета. С одной стороны, это делает целесообразным заимствование инженерами структурных особенностей крыла природных летателей, а с другой, – структуры таких крыльев представляют собой абсолютный оптимум, т.е., в некотором смысле, идеальную конструкцию для отработки численных методов структурной оптимизации, которые могут иметь широчайший спектр приложений.

Обычно насекомые имеют две пары крыльев (см. рис. 1), которые могут видоизменяться или редуцироваться: так, у жуков – передняя пара крыльев стала жестким панцирем, а *Diptera* – задняя пара превратилась в жужжальца – гироскопы). Крылья представляют собой тонкие двухслойные мембранные структуры. Между мембранами находится полость – продолжение полости тела. Крылья поддерживаются склеротизированными жилками, представляющими собой каналы в толще крыла, заполненные гемолимфой. Жилки содержат нервы и трахейные трубки, т.е. в них осуществляется газообмен и контроль со стороны нервной системы насекомого. У насекомых, выходящих из куколки, по жилкам нагнетается гемолимфа, а по трахеям – воздух; в результате чего крылья расправляются. Участвует ли гемолимфа в придании жесткости крылу взрослого насекомого, до настоящего времени неизвестно.

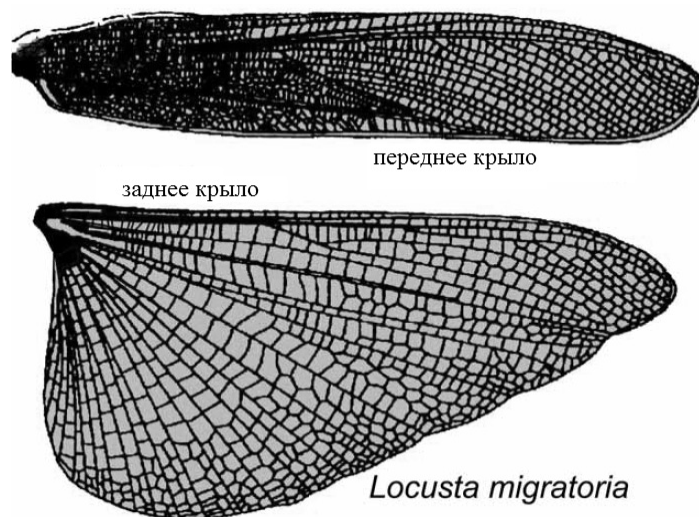


Рис. 1. Общий вид жилкования крыльев на примере стрекозы *Locusta migratoria*

Существенную особенность морфологии крыльев составляет характер жилкования. По расположению жилки делят на продольные и поперечные. У высших форм количество поперечных жилок сокращается или же они исчезают совсем. В этом случае функцию поддержки крыла несут только продольные жилки, поэто-

му паттерн их расположения в разных отрядах насекомых почти одинаков. Продольные жилки являются поочередно выпуклыми и вогнутыми, поэтому крыло на поперечном сечении выглядит складчатым [9] (см. рис. 2).

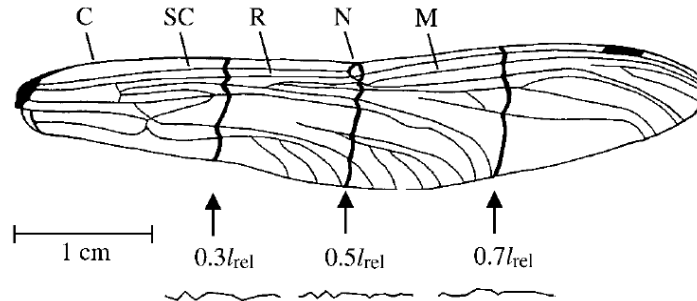


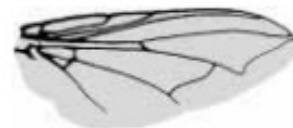
Рис. 2. Переднее крыло стрекозы *Aeshna cianea* и его поперечные сечения [9]

Складчатая структура позволяет достигать при каждом взмахе намного более высоких значений подъемной силы, чем, если бы крыло было абсолютно плоским [10].

Для насекомых высших семейств и подотрядов характерно смещение продольных жилок к переднему краю крыла. Это способствует укреплению передней кромки и улучшению аэродинамических показателей крыла. Расположение жилок влияет на летные качества насекомого, так как от него зависят динамические характеристики конструкции крыла, но до конца влияние типа жилкования до сих пор не изучено, что обусловлено многообразием и сложностью движений крыльев насекомых и максимальной приспособленностью типа жилкования к аэроупругим явлениям в полете.



Aeshna multicolor



Calliphora sp.



Рис. 3. Прimitивное сетчатое жилкование крыла стрекозы – наиболее древнего представителя класса насекомых



Рис. 4. Двукрылые – самый высокоорганизованный отряд класса насекомых. Четко видно смещение жилок к передней кромке

Непосредственное измерение механических свойств крыльев насекомых инструментальными методами затруднено из-за мелких размеров и хрупкости объектов. Первые успешные измерения механических свойств крыльев насекомых были выполнены косвенно через изгибную жесткость путем приложения точечных сил к изолированным секциям крыльев стрекоз (Newman и Wootton, 1986), саранчи (Wootton, Smith и др., 2000), бабочек (Steppan, 2000) [11]. Модуль упругости ($E \sim 2,2 \times 10^9$ Па) и коэффициент Пуассона ($\nu \sim 0.3..0.49$) [11] мембраны крыла были восстановлены по данным экспериментов с помощью конечно-элементного моделирования. Ранее была измерена плотность материала крыла $\rho \sim 1200$ кг/м³ (Wainwright и др., 1982) [11].

Измерения показали, что величина изгибной жесткости по размаху крыла сопоставима с кубом размаха, а вдоль хорды – с квадратом ее длины. Кроме того, для ряда протестированных видов насекомых было установлено, что изгибная жесткость по размаху крыла на 1-2 порядка больше изгибной жесткости вдоль хорды благодаря наличию жилок передней кромки [12].

Из-за чрезвычайно сложной кинематики и изменения геометрии крыла в полете число степеней свободы становится бесконечным. Поэтому известные математические модели, имитирующие машущий полет, всегда рассматривают крыло абсолютно жестким.

Однако даже в этом, достаточно грубом приближении, задача оптимального распределения сети армирующих жилок является чрезвычайно сложной. Некоторые подходы к ее постановке и решению представлены ниже.

2. Оптимизация топологии конструкций. Методы и алгоритмы. В самой общей формулировке под оптимизацией топологии понимают создание оптимальной структуры подвергаемой заданным нагрузкам конструкции, обеспечивающей достижение наилучших эксплуатационных показателей (прочности, жесткости, устойчивости) при ограничениях на размеры, форму или вес. Применительно к крылу задача оптимизации состоит в определении такого набора параметров модели крыла, которые, однозначно характеризуя его топологию, при выполнении ограничений на вес, обеспечивают наибольшую жесткость конструкции, требуемые для исключения флаттера взаимные расположения центров тяжести и центров жесткости сечений, максимально высокие собственные частоты. Чаще всего задача формулируется как минимизация податливости конструкции, смещений, запасенной энергии при заданных ограничениях на объем используемого материала.

Последние подходы к постановке и решению задачи параметрической оптимизации модели крыла насекомого основаны на использовании его цифровой фотографии [13], моделировании сети жилок при помощи графов: формы жилок – кривыми Безье, и толщины – полиномиальными функциями [14]. Создаваемая на каждом шаге оптимизационного процесса конечно-элементная модель крыла строит новую топологию сети жилок, форму и размеры жилок и мембранных ячеек. Однако на конец 2009 г. авторам работы [14] пока не удалось добиться удовлетворительных результатов.

Исторически первые успехи в оптимизации топологии были достигнуты в начале XXI в. с использованием разбиения пространства проектирования (design space) на малые дискретные элементы, которые некоторым образом или заполнялись материалом, или представлялись пустыми. Далее алгоритм оптимизации (чаще всего, генетический) строил такое распределение пустых и заполненных элементов, при котором достигался оптимум целевого функционала при удовлетворении ограничений. Однако для оптимизации даже весьма простых конструкций такой подход требовал использования мощных вычислительных кластеров.

Названные выше SIMP-методы направлены на получение квазидискретной (0-1) модели плотности распределения материала в пространстве проектирования.

В [15] М.Р. Vendsøe формулирует задачу оптимизации формы как задачу выбора оптимального тензора упругости $E_{ijkl}(x)$, представимого в виде:

$$E_{ijkl}(x) = X(x) \bar{E}_{ijkl}, \quad (1)$$

где \bar{E}_{ijkl} – тензор упругих констант используемого материала, $X(x)$ – функция-индикатор для части области $\Omega^m \subset \Omega$, занятой материалом, такая, что

$$X(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x \in \Omega^m \\ 0 & \text{при } x \in \Omega \setminus \Omega^m \end{cases}.$$

Описание допустимого тензора в виде (1) сводит задачу к оптимизации с функцией дискретно-значного параметра. В работах [15, 16] эффективность предложенной схемы продемонстрирована на примерах различных двумерных конструкций.

S.Y. Wang и K.M. Lim [17] разработали многоуровневый (level set) метод оптимизации топологии, где задача минимизации податливости сформулирована в вариационной форме

$$\text{Minimize}_x J(u, \Phi) = \int_{\Omega} F(u) H(-\Phi) d\Omega, \quad (2)$$

при условии

$$G(u, \Phi) = \int_{\Omega} g(u) H(-\Phi) d\Omega = 0. \quad (3)$$

Здесь в качестве целевого функционала взят функционал энергии J , g – функция ограничений. Функция $\Phi(x)$ есть level set функция, которая строится при помощи неявного метода. Данный метод основан на использовании радиальных базисных функций (РБФ), центрированных в некоторых особых точках или узлах, и записанных в виде: $\varphi_i(x) = \sqrt{(x - x_i)^2 + c_i^2}$, где c_i – некоторая константа. В работе для интерполяции скалярной неявной level set функции $\Phi(x)$ используется N мультиквадратичных сплайнов, центрированных в N узлах. Окончательно, $\Phi(x)$ принимает вид:

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \varphi_i(x) + p(x), \quad (4)$$

где α_i – вес i -й РБФ, $p(x)$ – полином первого порядка. Эффективность предложенной схемы подтверждается рядом примеров в [17], где рассмотрены двумерные короткие нагруженные консоли. Предложенная схема быстро находит оптимальное решение, хорошо сходится, слабо зависит от выбора начальной модели, но область ее применения ограничена такими формами конструкций, которые хорошо аппроксимируются набором центрированных функций типа (4).

Aditya P. Apte и др. [16] также использовали сеть базисных функций вида $\varphi_i(\|X - \mu_i\|, \alpha_i, \theta_i) = e^{-s_i^2}$, но для проектирования трехмерных топологий, а задачу оптимизации при ограничениях на общий объем используемого материала и плотность каждого элемента формулировали следующим образом:

$$\text{Minimize } f = u^T Ku, \quad (5)$$

где K – матрица жесткости конструкции, u – вектор смещений. На примерах трехмерной консоли и конструкции типа табурета показана работоспособность и эффективность данного метода.

Сопоставляя оба описанных подхода, можно отметить следующее. SIMP-метод является наиболее универсальным, но чрезвычайно зависимым от густоты конечно-элементного разбиения. Метод параметризации задачи сетью 3-D радиальных базисных функций является более эффективным в том смысле, что не требует конечно-элементного разбиения; в качестве параметров задачи выступают параметры РБФ, число которых сокращается с нескольких тысяч (что равно числу конечных элементов) до нескольких сотен.

3. Оптимизация топологии эллиптического в плане "крыла насекомого".

В качестве объекта оптимизации в работе использовали эллиптическую область, в плоскости x - y , близкую по форме крылу стрекозы (см. рис. 5). Построение модели выполняли в системе Comsol Multiphysics с подключением и связанной работой модулей 3D Structural Mechanics (уравнения трехмерной теории упругости) и Optimization Lab. "Крыло" моделировали двумя тонкими эллипсами, жестко соединенными плоскостями, причем нижний эллипс моделировал мембрану, а верхний - представлял собой область проектирования, в которой необходимо было выполнить оптимизацию топологии. К нижнему, сплошному эллипсу прикладывались распределенные нагрузки. В численных экспериментах использовали модели распределенных аэродинамических сил [7], которые испытывают элементы крыла в различных фазах махового движения. Левый срезанный край "крыла" закреплялся консольно. Выполнялся только статический анализ, т.е. для каждого распределения приложенных сил строилась своя картина жилкования, оптимальная для данного случая.

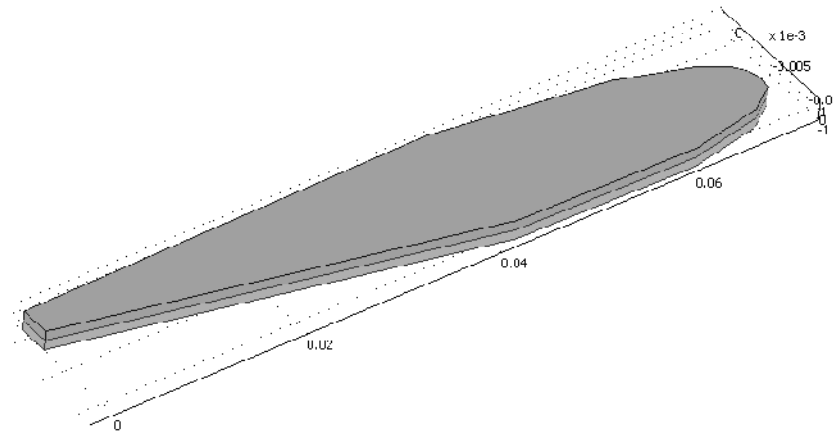


Рис. 5. Область моделирования состоит из двух подобластей: нижняя – мембрана, верхняя – жилкование

Задача оптимизации податливости верхнего слоя формулировалась как

$$\text{minimize } c(\rho) = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \varepsilon^T \mathbf{D}(\rho) \varepsilon d\Omega, \quad (6)$$

где

$$\int_{\Omega} \varepsilon^T \mathbf{D}(\rho) \varepsilon d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{f} u d\Omega + \int_{\Gamma} \mathbf{t} u ds. \quad (7)$$

В формулах (6), (7) Ω – область проектирования, ε, \mathbf{u} – векторы деформаций и смещений соответственно, \mathbf{D} – матрица жесткости, \mathbf{f} – массовая, и \mathbf{t} – поверхностная силы соответственно. Согласно SIMP-методу матрица жесткости представляется в виде

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D}(\rho, \mathbf{x}) &= \rho(\mathbf{x})^p \mathbf{D}_0 \\ p &> 1 \end{aligned} \right\} \mathbf{x} \in \Omega, \quad (8)$$

где \mathbf{D}_0 – матрица жесткости данного изотропного однородного материала (жилок), и p – штрафной параметр. Переменная $\rho(\mathbf{x})$, заданная всюду в области проектирования, которую следует интерпретировать как обобщенную плотность распределения материала, должна удовлетворять следующим ограничениям:

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq \int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}) d\Omega \leq V \\ 0 &\leq \rho(\mathbf{x}) \leq 1 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где V – объем материала, доступный для размещения в области проектирования. Значение параметра p , большее единицы, обеспечивает разделение зон с плотностями материала, равными 1 (материал) и равными нулю (нет материала). Согласно [19] SIMP-модели, материал рассматривается как двухфазный; и для упругого тела параметр p выбирался удовлетворяющим условию

$$p \geq \max \left\{ \frac{2}{1-\nu}, \frac{4}{1+\nu} \right\}. \quad (10)$$

Так, для материала с коэффициентом Пуассона 0,33 этот параметр выбирался равным 3.

Для получения приемлемой разрешающей способности создаваемой картины распределения жилок использовалось достаточно густое конечно-элементное разбиение – 8000 элементов в мембранном слое и 16000 в слое, предназначенном для восстановления картины жилкования. В качестве нулевого приближения для оптимизационной задачи принималось решение упругой задачи при равномерном распределении материала жилок. Машинное время для получения сходящегося решения составляло от одного до 2-3 часов на двухпроцессорном компьютере и зависело, в основном, от задаваемой доли материала верхнего слоя, подлежащего удалению. Один из примеров полученной картины приведен на рис. 6. Варьируя распределение поверхностных, действующих на крыло в отдельных фазах маховых движений, можно было получить изменяющуюся картину распределения жилок по мембране крыла. Наложение таких картин давало качественное совпадение с реальной картиной жилкования, представленной на рис. 4.



Рис. 6. Типичная картина распределения армирующих жилок на поверхности эллиптического в плане крыла – распределение функции $\rho(\mathbf{x})$

Выводы. Предварительными численными экспериментами по моделированию топологии крыла насекомого с использованием SIMP - метода показана принципиальная возможность оптимизации топологии структур типа крыльев насекомых с большой разреженностью армирующих элементов. Топология создаваемых "оптимальных" структур существенно зависела от конфигурации приложенных внешних сил и от доли поверхности, "разрешенной" алгоритму для размещения армирующих жилок. В связи с тем, что различным фазам маховых движений крыла соответствуют существенно различающиеся распределения поверхностных сил, оптимизируемая конструкция должна быть в некотором смысле оптимальна для всех возможных внешних воздействий. Решение этой задачи требует разработки и обоснования вида целевого функционала, а также постановки задачи оптимизации на базе динамического модального и нестационарного анализа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Michael H. Dickinson. Bionics: Biological insight into mechanical design / Proceedings of the National Academy of science (PNAS). – 1999. – Vol.96. – № 25. – P. 14208-14209.
2. Adaptive structures/ Engineering application, Part 9 Recent advances in self-healing materials systems. John Wiley & Sons Ltd, 2008. – 292 p.
3. Yoseph Bar-Cohen. Biomimetics—using nature to inspire human innovation / Bioinspiration & Biomimetics. – 2006. – Vol. 1. – № 1. – P. 317-321.
4. Ansari S.A., Zbikowski R., Knowles K. Aerodynamic modeling of insect-like flapping flight for micro air vehicles / Progress in Aerospace Sciences. – 2006. – № 42. – P. 129-172.
5. Ranjan Ganguli, Stanislav Gorb, Fritz-Olaf Lehmann. Experiments on Fly Wing Structure for Biomimetic Robotic Flying Insect Design / Proceedings of 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. – 2008. – 13 p.
6. Сви́дерский, В.Л. Полет насекомого / В.Л. Сви́дерский. – М.: Наука, 1980. – 136 с.
7. Hedrick T.L. and Daniel T.L. Flight control in the hawkmoth *Manduca sexta*: the inverse problem of hovering / Journal of Experimental Biology. – 2006. – № 209. – P. 3114-3130.
8. Simon M. Walker, Adrian L.R. Thomas, Graham K. Taylor. Deformable wing kinematics in free-flying hoverflies / Journal of the Royal Society Interface. – 2010. – № 7. – P. 131-142.
9. Antonia B. Kesel. Aerodynamic characteristics of dragonfly wing sections compared with technical aerofoils // J. of Exp. Biol. – 2000. – № 203. – P. 3125-3135.
10. Kwok M., Mittal R. Experimental Investigation of the Aerodynamics of a Modeled Dragonfly Wing Section: Student Conference AIAA – 2005.
11. Combes S.A. and Daniel T.L. Flexural stiffness in insect wings I Scaling and the influence of wing venation // J. of Exp. Biol. – 2003. – № 206. – P. 2979-2987.
12. Combes S.A. and Daniel T.L. Flexural stiffness in insect wings II Spatial distribution and dynamic wing bending // J. of Exp. Biol. – 2003. – № 206. – P. 2989-2997.
13. Marcelo H. Kobayashi. On a biologically inspired topology optimization method / Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat. – 2010. – № 15. – P. 787-802.

14. Mengesha T.E., Vallance R.R., Barraja M., Mittal R. Parametric structural modeling of insect wings / *Bioinspiration & Biomimetics*. – 2009. – № 4. – 15 p.
15. Bendsøe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem// Springer-Verlag: *Structural Optimization* 1. – 1989. – P. 193-202.
16. Bendsøe M.P., Sigmund O. Material interpolation schemes in topology optimization// *Arch. Appl. Mech.* – 1999. № 69. – P. 635-654.
17. Wang S.Y., Lim K.M., Khoo B.C., Wang M.Y. An extended level set method for shape and topology optimization// *Science Direct. Journal of Computational Physics* 221. – 2007. – P. 395-421.
18. Aditya P. Apte, Bo Ping Wang. 3D Topology Optimization Using Hyper Radial Basis Function Network//50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and materials Conference. 4-7 May, Palm Springs, California, 2009. – P. 12.
19. Bendsøe M.P., Sigmund O. *Topology Optimization Theory, Methods and Applications*, Springer Ed., 2004. – 296 p.

Шевцова Варвара Сергеевна

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет» г. Ростов-на-Дону.

E-mail: barbaragen4@mail.ru.

344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1.

Тел.: 88632738320.

Шевцова Мария Сергеевна

Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону.

E-mail: mariamarcs@bk.ru.

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Чехова, 41.

Тел.: 88632738712.

Соловьев Аркадий Николаевич

Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону.

E-mail: soloviev@math.rsu.ru.

344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8-А.

Тел.: 88632975282.

Shevtsova Varvara Sergeevna

State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Don State Technical University (DSTU)”.

E-mail: barbaragen4@mail.ru.

1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, Russia.

Phone: +78632738320.

Shevtsova Maria Sergeevna

Southern Scientific Center of Russian Academy of Sciences (SSC RAS).

E-mail: mariamarcs@bk.ru.

41, Tchehova street, Rostov-on-Don, 344006, Russia.

Phone: +78632738712.

Soloviev Arcady Nicolaevitch

Southern Federal University, Rostov-on-Don

E-mail: soloviev@math.rsu.ru.

8-A, Milchakova str., 344090, Rostov-on-Don, Russia.

Phone: +78632975282.