ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.04

DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.169-178

Численное моделирование местной и общей потери устойчивости гиперупругих труб с различными поперечными сечениями

Л. Ковалевский¹, С. Емело¹, В.И. Андреев²

¹ Варшавский технологический университет, 00-637, Польша, г. Варшава, ул. Лежа Качиньского, д. 16;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлен подход к применению программ конечных элементов (МКЭ) ABAQUS/Standard и ABAQUS/Explicit с различными уравнениями состояния несжимаемых изотропных гиперупругих материалов при анализе сжатых и растянутых оболочечных элементов из эластомеров. Эластомеры обычно используются в строительстве, а также в конструкционных оболочечных элементах, в частности трубах разных поперечных сечений.

Материалы и методы. Созданы три модели МКЭ для труб с одинаковой длиной и начальной жесткостью. Рассмотрены трубы с эллиптическим, квадратным и треугольным сечением. Использованы три типа структурных моделей из резиноподобного материала (эластомера) — с полиномиальной функцией упругой энергии в виде модели MV и стандартные модели Нео – Гука и Муни – Ривлина. В МКЭ моделях анализируемых труб не вводились начальные несовершенства. Численное моделирование выпучивания труб выполнялось для двух типов начальных и граничных условий — для квазистатических и динамических задач.

Результаты. Показано, что тип выпучивания зависит от поперечного сечения трубы. Сравнение решений по выпучиванию смоделированных труб с различными структурными моделями продемонстрировало хорошую корреляцию результатов. Приведена примерная история деформации эллиптического образца, проанализированного ABAQUS/Standard, нагруженная путем перемещения границы.

Выводы. Установлено, что программа ABAQUS/Standard позволяет использовать несжимаемые гиперэластичные материалы, программа ABAQUS/Explicit не предоставляет такой возможности. Из этого следует необходимость задавать параметры материала, связанные со сферической частью тензора напряжений. Параметр не должен быть слишком малым, иначе это приведет к числовым ошибкам. Решения задач об устойчивости моделей труб с различными физическими моделями дают хорошие корреляции результатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эластомеры, численное моделирование, конечно-элементное программное обеспечение, конечно-элементная модель, посткритическое поведение

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ковалевский Л., Емело С., Андреев В.И. Численное моделирование местной и общей потери устойчивости гиперупругих труб с различными поперечными сечениями // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 2. С. 169–178. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.169-178

Numerical simulations of local and global buckling of hyperelastic tubes with different cross-sections

Lukasz Kovalevsky¹, Stanislav Emelo¹, Vladimir I. Andreev²

¹ Warsaw University of Technology, 16 Lech Kaczynski st., Warsaw, 00-637, Poland;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe
shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An approach to the application of finite element programs (FEM) ABAQUS/Standard and ABAQUS/Explicit with various equations of state of incompressible isotropic hyperelastic materials is presented when analyzing compressed and stretched shell elements of elastomers. Elastomers are commonly used in construction as well as in structural shell elements, in particular pipes of different cross sections.

Materials and methods. Three FEM models for pipes with the same length and initial stiffness were created. Pipes with elliptical, square and triangular cross sections are considered. Three types of structural models of rubber-like material (elastomer) were used — with a polynomial elastic energy function in the form of the MV model and the standard models of Neo – Hooke and Mooney – Rivlin. In the FEM models of the analyzed pipes, not enter initial imperfections. Numerical modeling buckling of pipes was performed for two types of initial and boundary conditions — for quasistatic and dynamic problems.

Results. It is shown that the type of buckling depends on the cross section of the pipe. Comparison of buckling solutions for simulated pipes with different structural models demonstrated a good correlation of the results. An approximate history of the deformation of an elliptical sample analyzed by ABAQUS/Standard, loaded by moving the boundary, is given.

Conclusions. It has been established that the ABAQUS/Standard program allows the use of incompressible hyperelastic materials, the ABAQUS/Explicit program does not provide this possibility. This implies the need to set the parameters of the material associated with the spherical part of the stress tensor. The parameter should not be too small, otherwise it will lead to numerical errors. Solving problems on the stability of pipe models with different physical models give good correlations of results.

KEYWORDS: elastomers, numerical simulation, finite element software, finite element model, postcritical behavior

FOR CITATION: Kovalevsky L., Emelo S., Andreev V.I. Numerical simulations of local and global buckling of hyperelastic tubes with different cross-sections. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:2:169-178. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.2.169-178 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Эластомеры обычно используются в строительстве, а также в конструкционных оболочечных элементах, в частности трубах разных поперечных сечений. Цель статьи — представить приложение конечно-элементного программного обеспечения ABAQUS [1–6] с различными уравнениями состояния несжимаемых изотропных гиперупругих материалов при анализе сжатых и растянутых оболочечных элементов из эластомеров. Представлены три модели тонкостенных стержней с различными поперечными сечениями. Это трубы с эллиптическим, квадратным и треугольным сечением. Чтобы избежать концентрации напряжений последние два сечения выполнялись с закругленными углами. Кроме того, использовались три модели резиноподобных материалов — с упругой энергией, описываемой полиномиальной функцией в виде модели MV [7] и стандартные модели Нео – Гука и Муни – Ривлина [1, 2, 7, 8]. Описанные в работе задачи растяжения и сжатия труб можно разделить на два типа с точки зрения анализа — статические и квазистатические задачи [10, 14]. Статические задачи решались с использованием неявного метода и решателя ABAQUS/Standard [3, 5, 6], а квазистатические задачи решались явным методом [9] с использованием решателя ABAQUS/Explicit [4]. В последнем случае из-за явления потери устойчивости [10–14] анализ может рассматриваться как квазистатический только до определенной точки, так как внезапная потеря устойчивости делает невозможным опустить динамические явления [9].

Представленные задачи не приводят к недостаткам в созданных моделях. Для МКЭ вычислений программа ABAQUS/Standard предполагает, что нагрузки пропорциональны, т.е. все величины нагрузок отличаются только одним скалярным параметром. Поскольку граничные условия в оболочках задаются в перемещениях, применяется стандартный метод Ньютона – Рафсона, который является основным алгоритмом, используемым для нелинейных краевых задач [1–14].

В трудах [15, 16] для аналогичных примеров сжатия гиперэластических трубок с круговым и эллиптическим поперечным сечением применялся трехмерный подход в моделировании. Для сравнения обоих подходов, в дополнение к оболочке, анализируется трехмерная модель эллиптической трубки, в которой используются элементы с параболическими функциями формы и гибридная композиция сдвигового напряжения. В ABAQUS/Standard метод Рикса – Крисфилда [17–20] можно использовать для решения проблем закритического поведения как со стабильным, так и нестабильным поведением за пределами потери устойчивости.

Конечно-элементная модель

Уравнение состояния материала было описано для гиперупругой несжимаемой модели, применялись три различные формулы для потенциальной энергии деформации, базируясь на работах [1, 2, 7]:

$$W = U(\bar{I}_1, \bar{I}_2) = \sum_{k+l=1}^N C_{kl} (\bar{I}_1 - 3)^k (\bar{I}_2 - 3)^l, \quad (1)$$

Табл. 1. Ненулевые константы для исследуемого материала

Table 1. Non-zero constants for the material under study

Модель / Model	C_{10} , МПа / C_{10} , MPa	C_{01} , МПа / C_{01} , MPa	C_{20} , МПа / C_{20} , MPa	C_{11} , МПа / C_{11} , MPa	C_{30} , МПа / C_{30} , MPa
MV	0,17925	0,007725	–0,0018975	$-9,0 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$
MR	0,17925	0,007725	—	—	—
NH	0,18694	—	—	—	—

где ненулевые константы C_{kl} приведены в табл. 1. Эти данные представляют собой полиномиальную модель (MV) [7], модель Муни – Ривлина (MR) и модель Нео – Гука (NH) [7, 8]. В случае моделей NH и MR параметры материала выводятся на основе параметров полиномиальной модели таким образом, что начальная жесткость материала одинакова во всех случаях.

Ограничения несжимаемости материала, используемые в моделях ABAQSU/Standard, не могут применяться для анализа ABAQUS/Explicit. Из-за этого для заданий, рассчитанных с помощью явных методов, сжимаемость материала принимается в виде функции штрафа, включенной в потенциал энергии деформации:

$$W = U(\bar{I}_1, \bar{I}_2) + \frac{1}{D_{10}}(J^2 - 1).$$

В формуле (2) $D_{10} = 0,05$ МПа. Кроме того, плотность материала $d = 2,0$ г/см³.

Каждая конечно-элементная модель состоит из билинейных оболочечных элементов S4R с редуцированным интегрированием [3–5], тогда как 3D-модель использует элементы C3D20RH — 20-ти узловые элементы 20-ти элементной формы с квадратичными функциями формы [3, 4]. Поперечные сечения труб представлены на рис. 1, а на рис. 2 — сетки МКЭ труб с различным поперечным сечением. Длина каждой трубки равна 200 мм. Граничные условия выражены в перемещениях для двух случаев:

1. Одинаковые перемещения создавались на крайнем поперечном сечении стержня, в то время как узлы на фиксированном конце стержня имели нулевые перемещения: $u_1 = u_2 = u_3 = 0$, без каких-либо ограничений на поворот. На другом конце стержня

Рис. 1. Сечения моделей с размерами в мм. Стенка каждого поперечного сечения имела толщину 2 мм. Размеры подобраны так, что каждая модель имеет аналогичную начальную жесткость

Fig. 1. Sections of models with dimensions in mm. The wall of each cross section had a thickness of 2 mm. The dimensions are selected so that each model has a similar initial stiffness

Рис. 2. Сетка МКЭ трубы с: *a* — эллиптическим поперечным сечением (13 992 эл. S4R); *b* — квадратным поперечным сечением (14 080 эл. S4R); *c* — треугольным поперечным сечением (22 400 эл. S4R); *d* — эллиптическим трехмерным сечением (52 200 эл. C3D20RH)

Fig. 2. FEM grid of pipe with: *a* — elliptical cross section (13 992 el. S4R); *b* — square cross section (14 080 el. S4R); *c* — triangular cross section (22 400 el. S4R); *d* — elliptical three-dimensional section (52 200 el. C3D20RH)

устанавливалось: $u_1 = u_2 = 0, u_3 = U$, где $U = 800$ мм при растяжении и $U = -50$ мм при сжатии.

2. Сжатие обеспечивалось посредством контакта между анализируемой трубой и твердым телом оболочки, которая переносит нагрузку на стержень — в этом случае предельное смещение равно $U = -50$ мм, на фиксированной: $u_1 = u_2 = u_3 = 0, \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$, и на другом конце: $u_1 = u_2 = 0, u_3 = U, \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Каждый анализ выполнялся с использованием нелинейной геометрии (опция NLGEOM) [3, 4]. В случае испытаний на растяжение рассматривается только статический анализ ABAQUS/Standard [3, 6], в то время как в задачах сжатия такие решения сильно неустойчивы из-за изгиба трубок. Таким образом, только явный анализ [4] позволил наблюдать посткритическое поведение.

Для трубки с эллиптическим поперечным сечением трехмерная модель представлена также. Из-за относительно небольшой толщины стенок поперечного сечения такой подход требует большей плотности конечно-элементной сетки, что приводит к обычному усложнению численных расчетов. Общее количество переменных в модели увеличивается более чем в 5 раз (до 1 000 000), а время и ресурсы, необходимые для решения проблемы, увеличиваются на порядок.

Сравнение численных решений выполняется в основном путем сравнения глобальных реакций стержня с граничными условиями в перемещениях. Для испытаний на сжатие в ABAQUS/Explicit аналогичная реакция находится между жесткой оболочкой и деформируемым стержнем.

На рис. 3 представлено сравнение растягивающей силы между каждым анализируемым поперечным сечением и перемещением для материала MV. Поскольку поперечные сечения имеют близкие площади, эти диаграммы почти неотличимы. С другой стороны, реакции образцов с другой моделью материала показали сходство только в начальной фазе загрузки, при этом модель Нео – Гука демонстрировала немного большую жесткость в поздней фазе нагружения ($\lambda > 2$). Тем не менее полиномиальная модель будет представлять значительный рост жесткости, если удлинение образца еще больше. Разница в диапазоне применимости каждой модели очевидна — модели NH и MR начинают отклоняться от модели MV от смещения края трубы около 200 мм (100 % от длины образца).

Напротив, при сравнении отклика сжатых моделей не наблюдается очевидной разницы между каждым типом материала.

При анализе стержней использовались оболочечные элементы. Однако для эллиптического образца можно наблюдать, что трехмерная модель, несмотря на то, что имеет почти точную жесткость модели оболочки, теряет стабильность в более поздней фазе работы, чем модель оболочки.

Рис. 3. Сравнение диаграмм при растяжении трубок

Fig. 3. Comparison of diagram when stretching the tubes

Рис. 4. Сравнение деформированного состояния для трубы с эллиптическим сечением при расчете двумя методами: *a* — ABAQUS/Standard; *b* — ABAQUS/Explicit

Fig. 4. Comparison of the deformed state for a pipe with an elliptical cross section when calculated by two methods: *a* — ABAQUS/Standard; *b* — ABAQUS/Explicit

Рис. 5. Сравнение деформированного состояния трубы с квадратным поперечным сечением методами: *a* — ABAQUS/Standard; *b* — ABAQUS/Explicit

Fig. 5. Comparison of the deformed state pipe with square cross section by methods: *a* — ABAQUS/Standard; *b* — ABAQUS/Explicit

Рис. 6. Сравнение деформированного состояния трубы с треугольным поперечным сечением при расчете методами: *a* — ABAQUS/Standard; *b* — ABAQUS/Explicit

Fig. 6. Comparison of the deformed state pipe with a triangular cross section in the calculation by methods: *a* — ABAQUS/Standard; *b* — ABAQUS/Explicit

На рис. 4–6 представлены деформационные карты образцов в фазе после формования при стандартном и явном анализе.

Сравнение реакций каждой модели для явных и стандартных анализов и граничных условий в перемещениях представлено на рис. 7. Можно заметить, что, хотя сжимаемость материала предполагается в явном анализе, жесткость моделей совпадает с жесткостью в стандартном анализе. После потери устойчивости каждого образца результаты, полученные по явной схеме, показывают динамические колебания, появляющиеся как «шум» на рис. 7 и 8. Можно также заметить, что образцы, проанализированные ABAQUS/Explicit, демонстрируют более низкую грузоподъемность, чем трубы, решение для которых получено в статической постановке; несмотря на то, что жесткость образцов совпадает. Интересно отметить, что в случае явных задач наибольшая грузоподъемность наблюдается для стержня с эллиптическим поперечным сечением, тогда как в случае стандартного анализа квадратное поперечное сечение имеет большую предельную нагрузку (несмотря на то, что эллиптическое поперечное сечение показывает ту же жесткость в обоих типах анализа). Это связано с тем, что в статической за-

даче образец подвергается только местному выпучиванию, в отличие от динамической задачи.

Интересные явления могут наблюдаться при анализе поведения образцов, подвергнутых контактной нагрузке (рис. 8). Эллиптический образец может быть охарактеризован довольно похожим ответом на случай нагружения путем перемещения границы, однако треугольная и квадратная трубы показывают значительное повышение жесткости непосредственно перед достижением предельной нагрузки.

Единственное отличие, которое можно наблюдать между сжатыми образцами с различными материальными моделями, — это посткритическое поведение (рис. 9), где отображено сравнение реакции моделей с граничными условиями контакта.

В табл. 2 приведена примерная история деформации эллиптического образца, проанализированного ABAQUS/Standard, нагруженная путем перемещения границы. Соответствующими значениями в таблице являются: смещение U края образца (нагрузки), поле деформации с отображением максимальной абсолютной величины логарифмической деформации LE и максимальное значение LE во всей модели.

Рис. 7. Сравнение реакции сжатых стержней с различными сечениями при нагружении заданием перемещений методами ABAQUS/Standard и ABAQUS/Explicit

Fig. 7. Comparison of the reaction of compressed rods with different cross sections under loading by specifying displacements by methods ABAQUS/Standard and ABAQUS/Explicit

Рис. 8. Сравнение реакции сжатых стержней при нагружении заданием перемещений методом ABAQUS/Explicit

Fig. 8. Comparison of the reaction of compressed rods under loading by specifying displacements by the method ABAQUS/Explicit

Рис. 9. Сравнение реакции при сжатии стержней эллиптического сечения для разных моделей материалов при использовании ABAQUS/Explicit

Fig. 9. Comparison of the reaction at compression of rods of elliptical cross section for different models of materials at using ABAQUS/Explicit

Табл. 2. История деформации эллиптического образца, LE — максимальная логарифмическая деформация в образце (абсолютная величина)

Table 2. Elliptic sample deformation history, LE — maximum logarithmic deformation in the sample (absolute value)

U , мм / U , mm	Деформации / Deformations	LE max
8,5		0,0359
8,735		0,0361
8,755		0,0753
11,465		0,0939
11,470		0,1066

ЗАМЕЧАНИЯ И ВЫВОДЫ

Представлен анализ местной и общей потери устойчивости труб из резиноподобных материалов, сравнивающих результаты моделей с различными физическими соотношениями [3], поперечными сечениями и решаемые с помощью различных методов. Рассмотрены три модели тонкостенных труб с одинаковой жесткостью с различными поперечными сечениями. В МКЭ моделях анализируемых труб не обнаружены недостатки. Использованы три типа физических моделей эластомерного несжимаемого материала — с полиномиальной функцией упругой энергии в виде модели MV [7] и стандартных моделей Нео-Гука и Муни – Ривлина [8]. Численное моделирова-

ние выпучивания труб выполняется для двух типов начально-краевых задач — квазистатических и динамических. Показано, что тип выпучивания (общий или местный) зависит от поперечного сечения трубы.

В то время как программа ABAQUS/Standard [1–3, 5, 6] позволяет использовать несжимаемые гиперэластичные материалы, программа ABAQUS/Explicit не предоставляет такой возможности, откуда следует необходимость задавать параметры материала, связанные со сферической частью тензора напряжений. Кроме того, параметр не должен быть слишком малым, иначе это приведет к числовым ошибкам. Решения задач об устойчивости моделей труб с различными физическими моделями дают хорошие корреляции результатов.

ЛИТЕРАТУРА. REFERENCES

1. ABAQUS. Theory manual. Version 6.1. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 2000.
2. ABAQUS. Theory manual. Version 6.12. Dassault Systèmes, 2012.
3. ABAQUS/Standard. User's manual. Version 6.1. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 2000.
4. ABAQUS/Explicit. User's manual. Version 6.2. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 2001.
5. ABAQUS/Standard. Verification manual. Version 5.8. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 1998.
6. ABAQUS/Standard. Example problems manual. Version 5.7. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., Pawtucket, 1997.
7. Jemioło S. Study of hyperelastic properties of isotropic materials. Modeling and numerical implementation. Scientific Works // Civil Engineering. 2002. Vol. 140.
8. Lurie A.I. Nonlinear theory of elasticity. North-holland series in applied mathematics and mechanics. Amsterdam, 1990.
9. Belytschko T., Lin J.I., Tsay C.-S. Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1984. Vol. 42. Issue 2. Pp. 225–251. DOI: 10.1016/0045-7825(84)90026-4
10. Curnier A. Computational methods in solid mechanics. Dordrecht : Kluwer Academic Press, 1994. DOI: 10.1007/978-94-011-1112-6
11. Crisfield M.A. Non-linear finite element analysis of solids and structures. Vol. 1. Essentials. John Wiley and Sons, Chichester-Singapore, 1991. 360 p.
12. Crisfield M.A. Non-linear finite element analysis of solids and structures. Vol. 2. Advanced topics. John Wiley and Sons, Chichester-Singapore, 1997. 509 p.
13. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The finite element method. 5th edition. Vol. 2. Solid Mechanics. Butterworth-Heinemann, 2000. 479 p.
14. Bonet J., Wood R.D. Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis. 2nd edition. Cambridge : Cambridge University Press, 2008.
15. Jemioło S., Gajewski M. Hyperelastoplasticity. Warszawa : OWPW, 2017.
16. Zhu Y., Wilkinson T. Finite element analysis of structural steel elliptical hollow sections in compression // School of Civil Engineering. Research Report No. R874. Sydney, 2007. Pp. 1–38.
17. Riks E. The application of newton's method to the problem of elastic stability // Journal of Applied Mechanics. 1972. Vol. 39. Issue 4. Pp. 1060–1065. DOI: 10.1115/1.3422829
18. Riks E. Progress in collapse analyses // Journal of Pressure Vessel Technology. 1987. Vol. 109. Issue 1. Pp. 33–41. DOI: 10.1115/1.3264853
19. Crisfield M.A. A fast incremental/iterative solution procedure that handles «snap-through» // Computers & Structures. 1981. Vol. 13. Issue 1–3. Pp. 55–62. DOI: 10.1016/0045-7949(81)90108-5
20. Crisfield M.A. An arc-length method including line searches and accelerations // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1983. Vol. 19. Issue 9. Pp. 1269–1289. DOI: 10.1002/nme.1620190902

Поступила в редакцию 24 сентября 2018 г.

Принята в доработанном виде 17 декабря 2018 г.

Одобрена для публикации 29 января 2019 г.

О Б АВТОРАХ: **Ковалевский Лукаш** — магистр наук в области гражданского строительства, ассистент, **Варшавский технологический университет**, 00-637, Польша, г. Варшава, ул. Лежа Качиньского, д. 16, l.kowalewski@il.pw.edu.pl;

Емело Станислав — доктор технических наук, профессор, инженер-строитель (механические конструкции), заведующий кафедрой сопротивления материалов и теории упругости и пластичности, **Варшавский технологический университет**, 00-637, Польша, г. Варшава, ул. Лежа Качиньского, д. 16, s.jemiolo@il.pw.edu.pl;

Андреев Владимир Игоревич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой сопротивления материалов, академик РААСН, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, asv@mgsu.ru.

Received September 24, 2018

Adopted in a modified form on December 17, 2018

Approved for publication January 29, 2019

ABOUT THE AUTHORS: **Lukasz Kovalevsky** — Master of Science in Civil Engineering, Research-Teaching Assistant, **Warsaw University of Technology**, 16 Lech Kaczynski st., 00-637, Warsaw, Poland, l.kowalewski@il.pw.edu.pl;

Stanislav Emelo — Doctor of Technical Sciences, Professor, civil engineer (mechanical construction), Head of the Department of Strength of Materials and Theory of Elasticity and Plasticity, **Warsaw University of Technology**, 16 Lech Kaczynski st., 00-637, Warsaw, Poland, s.jemiolo@il.pw.edu.pl;

Vladimir I. Andreev — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Strength of Materials, academic of the RAACS, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation, asv@mgsu.ru.