

6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.deeplearning.net/tutorial/unet.html>. – Дата доступа : 17.05.2019.
7. Николенко, С. И. Глубокое обучение / С. И. Николенко, А. А. Кадурин, Е. О. Архангельская – СПб. : Питер, 2018.
8. Головки, В. А. Нейросетевые технологии обработки данных : учеб. пособие / В. А. Головки, В. В. Краснопошин. – Минск : БГУ, 2017.

31.01.2020

KNATSKEVICH M. V., GOLOVKO V. A., MIKHNYAEV L. P. Recognition of tree crowns on image using neural network methods

The article proposes the approach to solving the problem of tree crown recognition in satellite imagery. The main components of the architecture of U-Net neural network are given. The process of solving the problem of tree crown recognition in satellite imagery using U-Net neural network architecture. Based on experimental data, it can be concluded that the selected U-Net neural network architecture shows good enough results for solving the problem of tree crown recognition in satellite images.

004.942

Введение. В практике численного эксперимента актуальна проблема построения вычислительных схем моделирования специфических задач напряженно-деформированного состояния (НДС), решение которых стандартными хорошо изученными методами (разностные методы, метод конечных элементов, метод конечных объемов и др.) либо невозможно, либо сопряжено с серьезными сложностями.

Рассмотрим несколько классов задач, в которых вышеназванные методы используются редко:

1. Задачи разрушения и образования трещин в упругом твердом теле, а также с возможным наличием предустановленных (естественных) трещин [1, 2].
2. Задачи с сопряженными физическими процессами, например, в которых деформируемое твердое тело взаимодействует с пористой средой либо гидравлическими трещинами (моделирование гидро-разрыва пласта) [1, 2].
3. Задачи с гранулированной средой, контактными взаимодействиями элементов твердого тела [3].

Одним из популярных подходов при исследовании такого рода задач является использование дискретно-элементных (ДЭ) моделей. В данной работе мы будем рассматривать семейство ДЭ методов, множество разновидностей которого исследуются в литературе под следующими названиями: метод решетки пружин (Lattice String, Distinct Lattice Spring) [4, 5], метод масс-с-пружинками (Mass-Spring) [6], метод частиц-с-пружинками (Particle-Spring) [3]. В данной работе будет введен обобщенный термин для семейства таких методов.

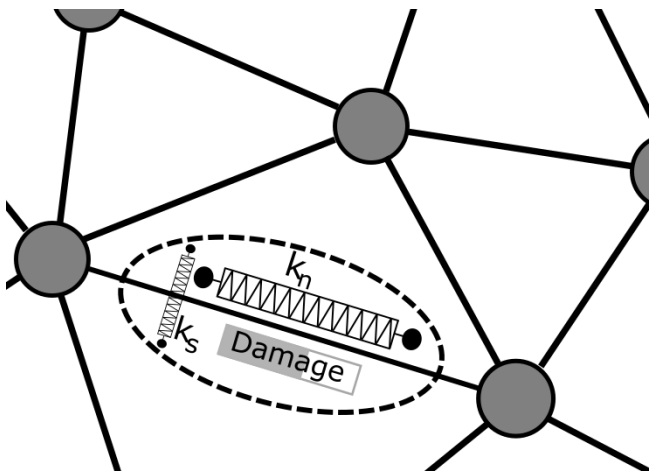


Рисунок 1 – Пример LS-схемы

Определения и постановка задачи. Определим LS-схему (Lattice spring) как вычислительную схему для решения задачи деформации твердого тела, поставленной в рамках модели НДС. В любой LS-схеме исследуемое деформируемое твердое тело представляется как набор *частиц* и *связей* (пружин), их соединяющих, обладающих определенным набором параметров. Часто параметры связи задают жесткость пружины при деформациях в определенном направлении относительно вектора первоначального расположения связи, например, нормальное и тангенциальное. Частицы (узлы) и связи (ребра) задают сетку определенной структуры, с помощью которой дискретизируется исследуемое твердое тело. Кроме того, определяется правило (функция усилия связи), по которому рассчитывается сила, оказываемая связью на смежные частицы в зависимости от величины её деформации и других свойств. С помощью этого правила могут быть заданы уравнения движения (для динамических задач) или уравнения баланса (для статических задач) системы частиц. Решение полученных уравнений дает информацию о движении частиц и, если выбранная LS-схема корректна, о поведении исходной НДС модели.

Под определение LS-схемы попадает большой класс вычислительных схем, которые могут иметь принципиальные различия между собой. Различия LS-схем касаются следующего:

1. Структура сетки, формируемой частицами и связями. Регулярность, случайность, размер окрестности вокруг частицы, в котором установлены связи, прочие свойства сетки.
2. Список используемых параметров на связи. При расчете сил связи могут использоваться пружины на нормальную, тангенциальную, угловую деформацию с индивидуальными параметрами упругости, вязкости, пластичности, накопления разрушения и прочего.
3. Правило расчета функции усилия связи. Определяет способ расчета итоговой силы на связи: использование линейного или нелинейного закона деформирования; правило одновременного использования нескольких пружин [7]; зависимость параметров от длины связи, использование (для связей с нормальной и тангенциальной пружиной) первоначальной нормали связи либо вычисление нормали по деформации окрестности частицы [4].

Для получения параметров LS-схем и доказательства их адекватности модели НДС обычно проводится достаточно сложное теоретическое исследование (например [8]). Зачастую такой подход обладает следующими недостатками:

1. Корректность LS-схемы доказывается только при достаточно большом числе используемых элементов или прочих предельных характеристиках схемы.

Чайко Виктор Валерьевич, ассистент кафедры информационных систем управления ФПМИ Белорусского государственного университета.

Конозалов Олег Леонидович, к. т. н., доцент, старший преподаватель кафедры информационных систем управления ФПМИ Белорусского государственного университета.

Беларусь, БГУ, 220050, г. Минск, пр. Независимости, 4.

2. Полученная схема корректна для моделей НДС с произвольными свойствами. Свойства материалов и размерность практических задач зачастую лежат в определенном диапазоне. Остается открытым вопрос о построении более точных схем для заданного диапазона параметров модели НДС.

3. Даже при незначительном изменении структуры LS-схемы зачастую требуется проводить работу по доказательству корректности схемы и нахождению ее параметров. Для некоторых LS-схем теоретическое доказательство их корректности и способ получения параметров является нерешенной задачей (например, корректность RMIB-схемы (Real Multidimensional Internal Bond) [4] на регулярной сетке явным образом не следует из RBIM-теории для случайных сеток).

Подход, предложенный в этой работе, направлен на разрешение этих недостатков с использованием ресурсов высокопроизводительных вычислений. Цель данной работы – предложить методику экспериментального исследования, верификации и получения параметров LS-схемы для заданной модели НДС.

Методика исследования LS-схем. Для исследования LS-схемы предлагается методика, включающая последовательность численных экспериментов. Опишем обобщенный алгоритм исследования LS-схемы. Исследование LS-схемы можно разделить на следующие этапы:

1. Верификация LS-схемы.

Ранее мы отметили, что параметры практических задач находятся в конкретных диапазонах. Условимся, что параметры LS-схемы и НДС-модели принадлежат множествам Ω_{LS} и Ω_{Model} . Исходя из размерности задачи и доступных вычислительных ресурсов, множества параметров Ω_{LS} и Ω_{Model} сужаются на конечные подмножества G_{LS} и в дальнейшем, выводы о корректности и точности схемы на параметрах из множеств G_{LS} переносятся и на множества параметров Ω_{LS} и Ω_{Model} .

а) Проверка поведения LS-схемы без использования моделей НДС.

Для каждой LS-схемы с набором параметров из G_{LS} проводится ряд экспериментов, позволяющих исключить некорректные схемы на основании несоблюдения базовых физических свойств: законы сохранения, изотропия материалов; а также неразрешимости полученных уравнений движения или баланса.

б) Сравнение поведение LS-схемы с использованием моделей НДС.

Для того чтобы определить, что данная LS-схема адекватна определенной модели НДС, создается набор модельных задач, максимально полно описывающие свойства деформируемого твердого тела (пример задач, для которых получено аналитическое решение, изложен в [9]). Вводится M – мера сходства решения LS-схемы и модели НДС на заданном наборе задач.

Для каждого набора параметров из $p_{Model} \in G_{Model}$ с помощью процедуры *OptimizeLS* находится набор параметров для LS-схемы $p_{LS} = \text{OptimizeLS}(p_{Model})$, $p_{LS} \in \Omega_{LS}$ с наилучшей мерой сходства M решений, полученных при решении модельных задач. В общем случае разработка процедуры для эффективного нахождения таких параметров – нетривиальная задача оптимизации. Однако для некоторых видов LS-схем построить такой метод не составляет труда, что можно увидеть в разделе 3.

На этом этапе решается вопрос о существовании LS-схем с приемлемой мерой сходства для моделей с параметрами из G_{Model} . В дальнейшем разработанная процедура *OptimizeLS* может быть использована в качестве инструмента для получения параметров LS-схемы по заданной модели НДС

2. Получение функциональной зависимости параметров LS-схемы от свойств модели.

Во многих известных LS-схемах зависимость $p_{LS} = F(p_{Model})$ имеет вид несложной рациональной функции. Например, зависимость параметров двухмерной RMIB-схемы [4]

$$k_n = \frac{2E}{\alpha^{2D}(1+\nu)(1-2\nu)};$$

$$k_s = \frac{2(1-4\nu)E}{\alpha^{2D}(1+\nu)(1-2\nu)}; \quad (1)$$

$$\alpha^{2D} = \frac{l \sum_i^2}{L^2}.$$

Используя это наблюдение, нахождение функциональной зависимости параметров схемы можно свести к решению задачи рациональной регрессии. По результатам предыдущих этапов может быть получена информация о точности LS-схемы в целом и для определенных диапазонов параметров.

Исследование VIB схемы на регулярной сетке. Продемонстрируем метод исследования на примере конкретной LS-схемы, использующей регулярную сетку и нормальную линейно деформируемую пружину. Опишем используемую модель НДС и исследуемую LS-схему.

Модель НДС описывает статическую задачу деформации твердого тела с малыми перемещениями и представлена системой дифференциальных уравнений [9]

$$\sigma_{j,i} + f_i = 0;$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} [(1+\nu)\sigma_{ij} - \nu\sigma_{kk}\delta_{ij}].$$

Для получения решения модельных задач использовалась разностная схема полученная аппроксимацией данных уравнений на сетке с мелким шагом. С использованием правила Рунге шаг сетки подобран так, чтобы погрешность решений не превышала 10^{-5} .

Выбран следующий набор модельных задач. На прямоугольник $A \times B$, заполненный упругим твердым материалом с параметрами из таблицы 1, действует внешняя сила F_0 , направленная под заданным углом γ . От теста к тесту варьируется величина силы F_0 и угол ее

приложения $\gamma \in \left\{ 0, \frac{\pi}{8}, \frac{4.3\pi}{8} \right\}$. Мера сходства определяется по

тесту с наибольшим отклонением решения LS-схемы и модели НДС.

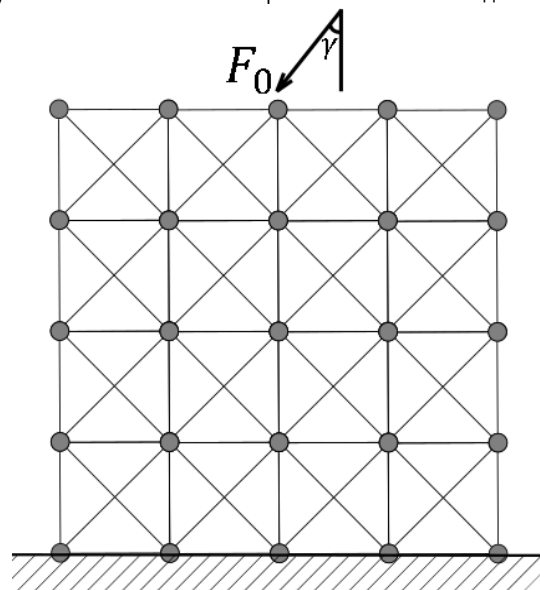


Рисунок 2 – Структура сетки LS-схемы. Формирование модельных задач

Исследуемая LS-схема — модификация VIB (Virtual Internal Bond) [4] схемы. Частицы и связи образуют регулярную сетку, показанную на рисунке 2. При расчете сил на связи используется одна

пружина, учитывающая абсолютное удлинение связи. Жесткость пружины различается на прямых и диагональных связях и обозначается k_1 и $k_2 = \alpha k_1$. Пружина действует на частицу с силой $F = k(l - l_0)$, направленной вдоль вектора связи (где l и l_0 текущая и первоначальная длины связи).

Таблица 1 – Параметры LS-схемы и модели НДС

Параметры модели НДС	Диапазон	Параметры LS-схемы	Диапазон
Модуль Юнга	0.5-5 ГПа	Жесткость прямой пружины	0.5-5 ГПа
Коэффициент Пуассона	0.1-0.4	α (Отношение жесткостей диагональной и прямой пружины)	0-2
Длина сторон, А, В,	1-5 м	Длина нормального ребра сетки, l	0.001-0.1

Отклонение решений LS-схемы и модели НДС назовем $\Delta u = \frac{\max_{x,y} |u_{model}(x,y) - u_{LS}(x,y)|}{\max_{x,y} |u_{model}(x,y)|}$, где $u_{model}(x)$ и $u_{LS}(x)$ – поля перемещения деформируемой среды, полученные решением LS-схемы и модели НДС.

Исследование LS-схемы проводится в соответствии с этапами, описанными выше.

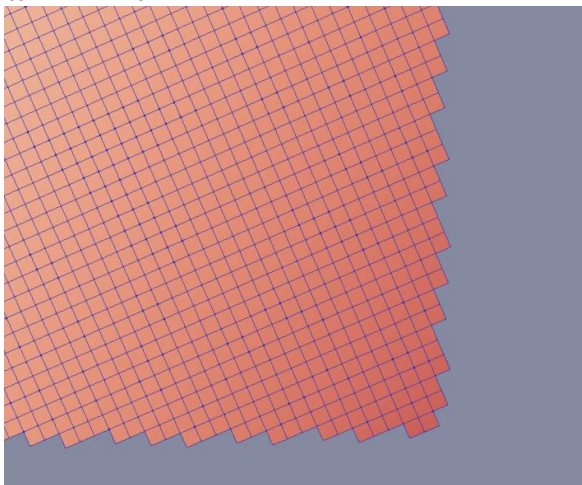


Рисунок 3 – Пример формирования сетки для теста на изотропию среды

1.а. В этом эксперименте проверяется изотропное поведение среды при одинаковых параметрах схемы, но различными поворотами сетки. Для этого строится сетка, заполняющая исходный прямоугольник $A \times B$, имеющая углы направления связей

$$\beta \in \left\{ 0, \frac{\pi}{8}, \frac{4.3\pi}{8} \right\}. \text{ Пример такой сетки для } \beta = \frac{\pi}{8} \text{ показан на}$$

рисунке 3. Сила F_0 прикладывается под углом $\gamma = 0$. Погрешностью решения некоторой схемы $\varepsilon(0)$ назовем отклонение от решения той же схемы с $\beta = 0$.

На рисунке 4 показаны результаты тестирования для схемы с параметром $k=10^9$ при изменении отношения жесткостей диагональной и прямой пружины α . По графику видно, что критерий изотропии среды соблюдается лучше всего для параметра $\alpha = 0.5$.

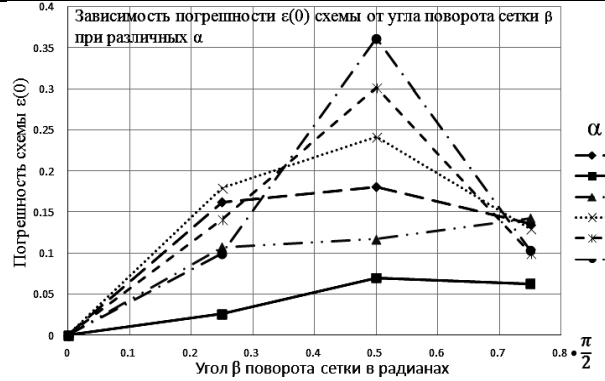


Рисунок 4 – Результаты эксперимента 1.а

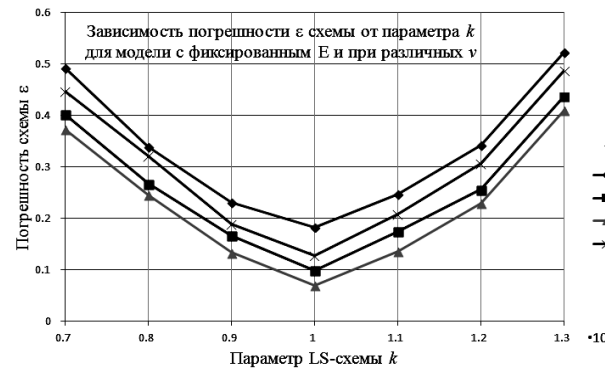


Рисунок 5 – Результаты эксперимента 1.б

1.б. Исследуется схема с $\alpha = 0.5$. Суть этого эксперимента заключается в построении процедуры *OptimizeLS*. Для фиксированных параметров модели E и ν вычисляется погрешность LS-схемы с определенным диапазоном параметров k . Здесь погрешность ε определяется как отклонение между решением LS-схемы и модели НДС на худшем тесте из набора модельных задач. Параметр k , на котором схема имеет наименьшую погрешность, будет оптимальным для заданной модели НДС. На рисунке 6 показаны результаты тестирования для модели НДС с фиксированным $E = 1.5$ ГПа и различными коэффициентами Пуассона.

Результаты показывают, что наиболее точное решение может быть получено для $\nu = 0.33$. Как видно по характеру получаемых графиков, для данной задачи процедуру *OptimizeLS* можно эффективно реализовать каким-либо методом поиска локального минимума, например методом деления пополам. Кроме того, использование *OptimizeLS* для заданных параметров позволяет оценить погрешность схемы $\varepsilon = 0.07$.

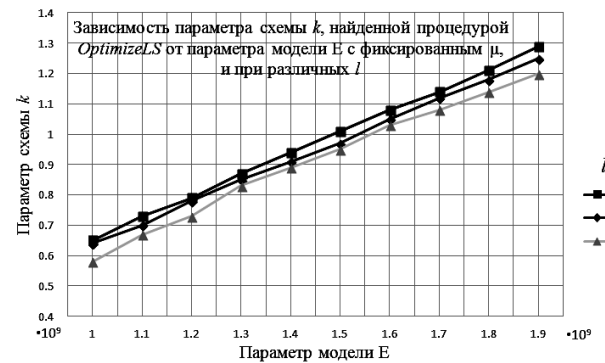


Рисунок 6 – Результаты эксперимента 2

2. Цель этого эксперимента состоит в получении функциональной зависимости параметров схемы. На рисунке 7 показаны результаты вычисления параметра k , полученного функцией *OptimizeLS* при различных параметрах E и размерах ребра сетки l .

Из проведенных тестов получаем следующую зависимость параметров для исследуемой схемы:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.5; \\ \nu &= 0.33; \\ k &= 0.67 \cdot E. \end{aligned} \quad (3)$$

Как видно из эксперимента 1.б., точность полученной схемы с оптимальными параметрами невысока даже для сравнительно большого числа частиц. Это связано с получением больших погрешностей на модельных задачах с углами γ , не совпадающими с направлениями ребер регулярной сетки. Из полученных результатов можно предположить, что данную схему следует применять только в задачах, для которых известно, что вектора главных напряжений и направлений ребер сетки

Заключение. Задачи, решаемые в современном компьютерном моделировании, постоянно усложняются за счет совершенствования аппаратной и программной базы параллельных вычислительных систем. В данной работе предлагается способ задействовать вычислительные ресурсы также и для исследования и калибровки схем, дальнейшее использование которых непосредственно определяет качество численного моделирования.

Предлагаемый подход продемонстрирован для структурно простой LS-схемы, использующей регулярную сетку и нормальную линейно деформируемую пружину. Несмотря на простоту, подобные схемы могут иметь практическое применение. Мотивация использования регулярной сетки связана с удобством реализации эффективных алгоритмов с помощью массово-параллельных систем. Кроме того, благодаря специальной структуре сетки, с ребрами, расположенными под фиксированными углами, схема может быть расширена для моделирования анизотропных свойств среды.

Для исследуемой LS-схемы процедуры получения параметров не потребовали больших вычислительных затрат, чего нельзя утверждать для произвольной LS-схемы. Цель дальнейшей работы состоит в получении эффективных методов для исследования и калибровки структурно более сложных LS-схем.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Краснопрошин, В. В. Алгоритм расчета геометрических параметров плоских геометрических трещин / В. В. Краснопрошин, О. Л. Коновалов, В. В. Чайко // Вестник Брестского государственного

- ного технического университета. – 2017. – № 5 : Физика, математика, информатика – С. 23–26.
2. Chaiko, V. V. DEM-FVM conjugated parallel solver for hydraulic fracturing / V. V. Chaiko, O. L. Konovalov // 2nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference, 20-22 June 2018, Seattle, Washington, USA / Publisher: American Rock Mechanics Association.
3. Theoretical Background // Granular Dynamics, Contact Mechanics and Particle System Simulations: A DEM study / Thornton, Colin – Springer, 2015. – Ch. 2. – P. 13–25.
4. Zhao, G. Development of Micro-Macro Continuum-Discontinuum Coupled Numerical Method // Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – 2010.
5. Gao, H. Numerical simulation of crack growth in an isotropic solid with randomized internal cohesive bonds / H. Gao, P. Klein // Journal of the Mechanics and Physics of Solids – Vol. 46 – Is. 2 – 1998. – P. 187–218.
6. Etmuss, O. Deriving a particle system from continuum mechanics for the animation of deformable objects / O. Etmuss, J. Gross and W. Strasser / IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2003. – Vol. 9 – No. 4 – P. 538–550.
7. Liu, Y. Viscoelastic model for discrete element simulation of asphalt mixtures / Y. Liu, Q. Dai, Z. You // Journal of Engineering Mechanics – 2009. – Vol. 135 – Is 4. – P. 324–333.
8. Zhang, Z. A new quasi-continuum constitutive model for crack growth in an isotropic solid / Z. Zhang, X. Ge // European Journal of Mechanics - A/Solids – Vol. 24 – Is. 2 – 2005 – P. 243–252.
9. Baker, G. An exact solution to the two-dimensional elasticity problem with rectangular boundaries under arbitrary edge forces / G. Baker, M. N. Pavlović, N. Tahan // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Physical and Engineering Sciences. – 1993. – Vol. 343 – Is. 1668 – P. 307–335.
10. Sarmadivaleh, M. Numerical and experimental investigation of the interaction of natural and propagated hydraulic fracture / H. Fatahi, M. Hossain, M. Sarmadivaleh // Journal of Natural Gas Science and Engineering – Vol. 37 – 2017 – P. 409–424.
11. Fu, P. Generalized displacement correlation method for estimating stress intensity factors / P. Fu, S. Johnson, R. Settgest, C. Carrigan // Engineering Fracture Mechanics – Vol. 88 – July 2012 – P. 90–107.

31.01.2020

CHAIKO V. V., KONOVALOV O. L., KRASNOPROSHIN V. V. Computational scheme for modeling of stress-strain state based on lattice spring method

The paper proposes an approach for calibration and verification of the computational scheme based on the lattice spring method. Using the proposed algorithm we study the scheme with the regular grid and normal linear spring. The optimal parameters and accuracy of the scheme are calculated.

004.021:032.26

.

Ведение. Задача обучения нейронной сети прямого распространения состоит в нахождении весовых коэффициентов w_{ij} и порогов T_j нейронной сети, которые минимизируют функцию ошибки сети

$$E(w_{11}, w_{21}, \dots, w_{m1}, T_1, w_{12}, w_{22}, \dots, w_{m2}, T_2, \dots, w_{1n}, w_{2n}, \dots, w_{mn}, T_n) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (y_j - t_j)^2,$$

где $y_j = F(S_j)$ – значение функции активации j -го выходного нейрона сети, $S_j = \sum_{i=1}^m w_{ij} x_i - T_j$, x_i – выходное значение i -го

Махнiст Леонiд Петровiч, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой высшей математики Брестского государственного технического университета.

Гладкий Иван Иванович, старший преподаватель кафедры высшей математики Брестского государственного технического университета.

Каримова Татьяна Ивановна, к. физ.-мат. н., доцент кафедры высшей математики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.