

УДК 613.481

РЕГРЕССИОННЫЕ МОДЕЛИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ КОМФОРТНОГО КОМПЛЕКТА СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЫ

©2016 г. И. Н. Иващенко, С. В. Усатиков, *С. П. Шмалько

Кубанский государственный университет,

*Академия маркетинга и социально-информационных технологий, г. Краснодар

Рассмотрены проблемы проектирования специальной одежды работников нефтедобывающей отрасли для решения задачи поддержания теплового гомеостаза человека с применением многослойных теплозащитных пакетов материалов. Обработан массив экспериментальных данных о свойствах современных материалов, предназначенных для защиты от высоких и низких температур (с учетом заданных климатических условий и динамики движений работающего), на примере специальной одежды работников нефтедобывающей отрасли южного региона России.

Поставлена и решена задача оптимального выбора пакета материалов для комфортных условий работы в исследуемой одежде. Критерием качества выбрана теплоизоляция специальной одежды. Уравнения связи задачи оптимизации получены с помощью регрессионного анализа взаимосвязей между структурными и теплофизическими параметрами комплекта материалов теплозащитной многослойной одежды, таких как теплоизоляция, поверхностная плотность, воздухопроницаемость, толщина покровного материала, приемлемого для данного пакета материалов и температуры внешней среды. Получено уравнение квадратической регрессии для теплоизоляции.

На основе предложенной регрессионной модели решена задача максимизации критерия качества. Методами квадратического программирования определены оптимальные: общая толщина пакета материалов, толщина покровных материалов и воздухопроницаемость пакета материалов, при которых теплоизоляция специальной одежды создает максимально комфортные условия труда. Это позволяет установить максимально приемлемую для заданных условий конструкцию специальной одежды, а также адаптировать процесс комплектации пакета материалов для специальной одежды с необходимой теплоизоляцией к комфортным условиям труда.

Ключевые слова: теплозащитная многослойная одежда, регрессионная модель, оптимизация теплового сопротивления

OPTIMIZATION OF HEAT-INSULATION OF SPECIAL CLOTHING: AN ANALYSIS USING REGRESSION MODELS

I. N. Ivashchenko, S. V. Usatikov, *S. P. Shmalko

Kuban State University, Krasnodar,

*Academy of Marketing and Social Information Technologies, Krasnodar, Russia

The article deals with the problems of designing special clothing for the workers of the oil producing industry, solving the problem of maintaining thermal homeostasis person using multi-layer heat-shielding stackup materials. We processed array of experimental data on the properties of advanced materials designed to protect against high and low temperatures (with the defined climatic conditions and the dynamics of movement works), as the example of special clothing for the workers of the oil producing industry of the southern region of Russia. The article tells about posed and solved problem of optimal choice of package materials for comfortable working conditions in the test clothing. The criterion for the quality of insulation is special clothing. Equations connection optimization problem obtained by regression analysis of the relationship between the structural and thermal parameters set heatproof materials multilayered clothes: such as insulation, surface density, permeability, thickness of the coating material that is acceptable for the package materials and ambient temperature. We got the equation for quadratic regression insulation. On the basis of an offer regressive model, the optimal are certain the methods of the quadratic programming: thickness of package, thickness of the coating color and air permeability of the package of materials the heat-insulation of clothing has maximal comfort. It allows to set the maximum acceptable for the given conditions of the construction of special clothing, as well as to adapt the process of picking a package of materials for special clothing with the necessary insulation for comfortable working conditions.

Keywords: heat-protective multi-layered clothing, regressive model, optimization of the thermal resistance

Библиографическая ссылка:

Иващенко И. Н., Усатиков С. В., Шмалько С. П. Регрессионные модели и оптимизация теплоизоляции комфортного комплекта специальной одежды // Экология человека. 2016. № 4. С. 21–25.

Ivashchenko I. N., Usatikov S. V., Shmalko S. P. Optimization of Heat-Insulation of Special Clothing: an Analysis Using Regression Models. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2016, 4, pp. 21-25.

Жизнедеятельность человека постоянно находится в контакте с окружающей средой [1, 6–8]. Многочисленный контингент работающих в стратегических отраслях России часто выполняет технологические задачи на открытом воздухе [11], в том числе и в

режиме круглосуточной работы [2, 10], что требует обеспечения одеждой с высокими теплозащитными свойствами. Поддержание теплового равновесия организма (теплового гомеостаза) человека возможно при условии использования многослойной

теплозащитной одежды. Одежда создает вокруг тела микроклимат, который при рациональном согласовании свойств каждого слоя обеспечивает устойчивое тепловое равновесие пододежного пространства и адаптацию к изменяющимся условиям. Универсальные рекомендации аналитического подхода по выбору рационального состава пакета материалов в комплекте теплозащитной одежды в данный момент времени отсутствуют.

Российские и зарубежные ученые часто обращаются к теме теплоизоляционной способности одежды. Появление текстильных материалов с новыми свойствами и развитие компьютерных технологий существенно изменили традиционные подходы к процессам проектирования и производства специальной теплозащитной одежды. В этих условиях широко применяются методы регрессионного моделирования и теории оптимизации [5, 9, 12–15]. Так, в статье [9] используют математические модели множественной регрессии и квадратичной нелинейной регрессии для информационной основы выбора конструктивных средств обеспечения динамического соответствия в одежде. В работе [5] исследованы трикотажные полотна, проведен корреляционный анализ чувствительности и оптимизация параметров. В исследовании [15] на основе экспериментов на человекообразном тепловом манекене создана регрессионная модель теплоизоляции одежды с учетом ветра и динамики движений человека. В статье [13] исследована многослойная одежда и свойства пакетов применяемых материалов с учетом воздушной прослойки между слоями, но без учета климатических условий. А также создана и экспериментально подтверждена математическая модель для прогнозирования комфортного состояния человека. В работе [14] изучались многослойные структуры одежды, защищающие от повышенных температур, и свойства тканей с содержанием арамидных и вискозных волокон.

В исследовании [5] авторами рассчитано максимально возможное суммарное тепловое сопротивление пакета материалов одежды, зависящее от толщины покровного материала и воздухопроницаемости материалов на примере нефтедобывающего производства южного климатического региона России. В экспериментальной лаборатории определены свойства различных пакетов из разнообразных материалов, применяемых для теплозащитной специальной одежды [3]. Исследовались пакеты современных материалов для защиты от холода [4], покровные и теплоизоляционные материалы с различными сочетаниями волокон в структурах с учетом климатических условий и энергозатрат работающих. Задачей нашего исследования являлось теоретическое обоснование выбора пакета материалов теплозащитной многослойной одежды с учетом взаимосвязей между структурными и теплофизическими параметрами материалов, а также оптимизация значимых параметров, при которых теплоизоляция одежды максимально комфортна.

Методы

Для выявления теплозащитных свойств комплектов одежды в лаборатории материаловедения ЦНИИШП проведены комплексные исследования [3] проницаемости (воздухопроницаемости, паропроницаемости, гигроскопичности) и структурных характеристик (поверхностной плотности, толщины) ассортимента специальных тканей, а также различных видов пакетов материалов с утеплителями. Исследуемые ткани подразделялись на три группы: ткани различной поверхностной плотности; ткани однородной поверхностной плотности (210–220 г/м²), но различного сырьевого состава; ткани с различными видами покрытий. На основе полученных данных проведено экспериментальное исследование специальной одежды нефтяников южного региона России [4] с учетом климатических условий и динамики движений работающего.

Для оптимального выбора пакета материалов одежды для особых условий работы нефтяников была проведена аналитическая обработка экспериментальных данных с помощью регрессионного анализа. На основе предложенной регрессионной модели методами квадратического программирования определены оптимальные параметры: толщина пакета, толщина покровных материалов и воздухопроницаемость пакета материалов, при которых теплоизоляция одежды максимально комфортна.

Результаты

Первым шагом являлось определение факторов-аргументов и квадратичной регрессионной модели теплоизоляции комплекта специальной одежды средствами пакета STATISTICA v.8.0 (StatSoft Inc, 2009).

На теплоизоляцию одежды оказывают влияние теплофизические (тепловое сопротивление, теплопроводность, теплоемкость) и структурные (пористость, средняя плотность, толщина) показатели свойств материалов, применяемых в комплекте теплозащитной одежды. Связь между теплофизическими характеристиками материалов и параметрами их структуры сегодня недостаточно исследована.

Задачей нашего исследования было изучение взаимосвязей между показателями предоставленной выборки многомерного случайного вектора, представляющего собой теплофизические параметры пакета материалов многофункциональной структуры теплозащитной одежды (таблица). Исследование было необходимо для обоснованных рекомендаций теоретических подходов к разработке, проектирования и моделирования комплектов теплозащитной одежды для швейной отрасли.

Было исследовано шесть показателей. Первый показатель U — теплоизоляция комплекта являлся искомой функцией отклика от остальных показателей: X_1 — поверхностная плотность, X_2 — воздухопроницаемость, X_3 — толщина покровных материалов, X_4 — толщина пакета, X_5 — температура внешней среды.

Указанные аргументы взаимосвязаны. Для устра-

Экспериментальные данные [3, 4] измерений теплофизических параметров многофункциональной структуры теплозащитной одежды

Теплофизические параметры покровных материалов			Теплофизические параметры комплекта одежды			
Вид материалов (артикул)	Поверхностная плотность, г/м ²	Толщина покровных материалов (Y), мм	Теплоизоляция комплекта (U), °См ² /Вт	Воздухопроницаемость (Z), дм ³ /м ² с	Толщина пакета (X), мм	Температура, °С
10408	304	0,73	0,678	21	26,5	-35
10409	350	0,88	0,577	21	14,0	-2,2
16362	222	0,72	0,541	32	15,0	-10
18439 ах	239	0,59	0,432	47	10,8	-2,2
80406 (без покрытия)	173	0,3	0,321	40	6,6	-2,2
81421	255	0,63	0,577	19	14,0	-2,2
81423	217	0,45	0,405	35	9,7	-10
81424	199	0,51	0,541	32	15,7	-10
87309	244	0,47	0,599	17	14,0	-10
Климат 1	223	0,31	0,753	0	28,0	-25
Климат 2	236	0,35	0,722	0	28,0	-10
Климат 3			205	0,32	0,678	0

нения мультиколлинеарности и выявления независимых факторов-аргументов использован метод пошагового включения линейной множественной регрессии. Выделено три аргумента: толщина пакета X, толщина покровных материалов Y, воздухопроницаемость Z; при числе степеней свободы d.f. = 3,8 критерий Фишера – Снедекора F = 70 и уровне значимости $p = 4 \cdot 10^{-6}$. Квадрат множественного коэффициента корреляции $R_2 = 0,96$ близок к квадрату исправленного коэффициента 0,95. При этом уровень значимости критерия Стьюдента всех параметров регрессии $p < 0,015$.

Для функции отклика U от аргументов X, Y и Z проведён множественный линейный и квадратичный регрессионный анализ. Наилучшие результаты даёт

квадратичная регрессионная зависимость (1) теплоизоляции комплекта (U) от толщины пакета (X), толщины покровных материалов (Y) и воздухопроницаемости (Z):

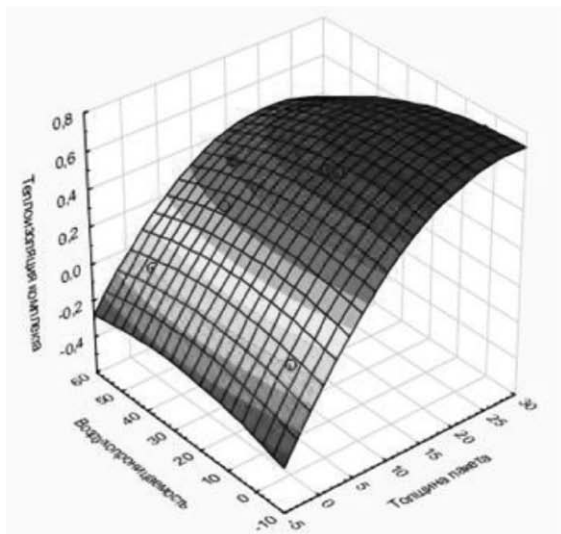
$$U = 0,77Y + 0,035X - 0,3Y^2 - 0,00045X^2 - 0,0064ZY - 0,0128YX \quad (1)$$

Число параметров модели 6, объём выборки $n = 12$. Индекс корреляции полученной зависимости $R = 0,998$; анализ остатков показывает относительную погрешность прогноза $< 1,5 \%$. Уровни значимости по критерию Стьюдента параметров модели (1): для толщины покровных материалов – 0,016; толщины пакета – 0,0016; квадрата толщины покровных материалов – 0,13; квадрата толщины пакета – 0,07; толщины покровных материалов и воздухопроницаемости – 0,0034, толщины покровных материалов и толщины пакета – 0,023.

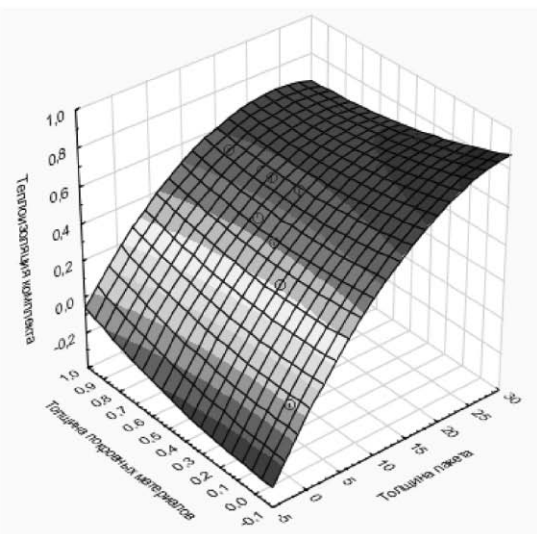
В качестве графической иллюстрации полученной квадратической взаимосвязи (1) представлен рисунок.

Слой пакета материалов имеют различные функции и структуры, их рациональный выбор способствует достижению одной цели – обеспечению функциональной целостности, сохранению и поддержанию равновесного (сбалансированного) температурного режима пододежного пространства. Поэтому на заключительном этапе исследования был произведен поиск оптимального значения теплоизоляции комплекта одежды, зависящей от трех значимых факторов – по толщине пакета материалов и покровных материалов, а также их воздухопроницаемости. Расчёты по оптимизации проведены средствами пакета MathCAD v.14.0 (Parametric Technology Corporation, 2009) оператором Maximize.

Для поиска оптимального значения теплоизоляции комплекта одежды была поставлена и решена задача квадратического программирования, состоящая из целевой функции – зависимости (1) и допустимого множества (2):



а



б

Квадратическая регрессия (1) взаимосвязи теплоизоляции комплекта с толщиной пакета и воздухопроницаемостью (а), с толщиной пакета и толщиной покровных материалов (б)

$$\begin{cases} 0 \leq X \leq 50, \\ 0 \leq Y \leq 2, \\ 0 \leq Z \leq 30 \end{cases} \quad (2)$$

Задача квадратического программирования (1) – (2) была решена методом сопряженных градиентов. В результате получено оптимальное значение толщины пакета материалов, равное 29,5 мм; оптимальное значение толщины покровных материалов – 0,664 мм; минимально возможное значение воздухопроницаемости – 0 дм³/м²с; а прогнозируемая теплоизоляция комплекта материалов – 0,777 °См²/Вт.

Обсуждение результатов

Снижение воздухопроницаемости одежды является одним из основных резервов повышения эффективности теплоизоляции современной теплозащитной одежды за счет рационального выбора сбалансированных по показателям комфортности слоев материалов.

Обработанные методом регрессионного анализа данные теплоизоляции, толщины, воздухопроницаемости комплекта одежды и других показателей позволяют существенно оптимизировать выбор пакета материалов и определить условия работы в нём. Учесть влияние всех параметров и свойств в комплекте теплозащитной одежды – сложная задача, но рациональное сочетание слоев материалов по принципу единства и согласованности свойств обеспечивает надежную теплоизоляцию организма при малой массе одежды.

Полученное уравнение регрессии теплоизоляции комплекта теплозащитной многослойной одежды и его оптимизация имеют практическую значимость в возможности ее широкого использования:

- на предприятиях швейной отрасли при проектировании теплозащитной одежды и выборе для нее оптимального пакета материалов и определения комфортной теплоизоляции;
- как комплекса рекомендаций по формированию рациональной структуры новых промышленных образцов спецодежды для защиты от холода работающих в суровых климатических условиях;
- в образовательном процессе как учебно-методическая база для обучения специалистов в области проектирования одежды, дизайна костюма.

Список литературы

1. Агаджанян Н. А., Ермакова Н. В. Экологический портрет человека на Севере. М.: КРЭК, 1997. 208 с.
2. Гудков А. Б. Физиологическая характеристика нетрадиционных режимов организации труда в Заполярье: автореф. дис. ... д-ра мед. наук. Архангельск, 1996. 32 с.
3. Иващенко И. Н., Кириллова Л. И., Калина О. Н., Замятина Г. С. Исследование взаимосвязи свойств покровных материалов и теплозащитных свойств пакета материалов утепленной одежды // Швейная промышленность. 2011. № 1. С. 32–33.
4. Иващенко И. Н., Беляева С. А. Проектирование теплозащитной специальной одежды для работников нефтедобывающей отрасли: монография. Краснодар, 2012. 110 с.

5. Иващенко И. Н., Шмалько С. П. Регрессионные модели и оптимизация суммарного теплового сопротивления покровных материалов одежды для нефтяников // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. С. 1–7. URL: <http://www.science-education.ru/117-13517> (дата обращения 07.05.2015)

6. Карпин В. А., Гудков А. Б., Катюхин В. Н. Мониторинг заболеваемости коренного населения Ханты-Мансийского автономного округа // Экология человека. 2003. № 3. С. 3–8.

7. Кубушка О. Н., Гудков А. Б. Особенности структуры жизненной ёмкости лёгких у северян старшего школьного возраста // Вестник Поморского университета. Серия: Физиологические и психолого-педагогические науки. 2003. № 1. С. 42–50.

8. Никитин Ю. П., Хаснулин В. И., Гудков А. Б. Современные проблемы северной медицины и усилия учёных по их решению // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Медико-биологические науки. 2014. № 3. С. 63–72.

9. Розанова Е. А., Москаленко Н. Г., Стрельцов И. П. Разработка математической модели для определения параметров замкнутой системы «человек – спортивная одежда» // Фундаментальные исследования. 2013. № 11. С. 1142–1146.

10. Сарычев А. С., Алексеенко В. Д., Симонова Н. Н., Гудков А. Б., Дёгтева Г. Н. Проблемы вахтового труда в Заполярье // Медицинский академический журнал. 2007. Т. 7, № 4. С. 113–119.

11. Чащин В. П., Сюрин С. А., Гудков А. Б., Попова О. Н., Воронин А. Ю. Воздействие промышленных загрязнений атмосферного воздуха на организм работников, выполняющих трудовые операции на открытом воздухе в условиях холода // Медицина труда и промышленная экология. 2014. № 9. С. 20–26.

12. Ali Afzal, Tanveer Hussain, Muhammad Mohsin, Abher Rasheed, Sheraz Ahmad. Statistical models for predicting the thermal resistance of polyester/cotton blended interlock knitted fabrics // International Journal of Thermal Sciences. 2014. N 85. P. 40–46.

13. Apurba Das, Ramasamy Alagirusamy and Pavan Kumar. Study of Heat Transfer Through Multilayer Clothing Assemblies: A Theoretical Prediction // Autex Research Journal. 2011. Vol. 11, N 2. P. 40–46. Available at: http://www.autexrj.org/No2-2011/5_0013_11.pdf (accessed 07.05.2015).

14. Lilioara Surdu, Carmen Ghituleasa, Carmen Mihai, Alexandra Ene. Comfort properties of multilayer textile materials for clothing // Industria Textila. 2013. Vol. 64, N 2. P. 75–79.

15. Xiaoming Qian and Jintu Fan. Prediction of Clothing Thermal Insulation and Moisture Vapour Resistance of the Clothed Body Walking in Wind // Annals of Occupational Hygiene. 2006. Vol. 50, N 8. P. 833–842.

References

1. Agadzhanian N. A., Ermakova N. V. *Ekologicheskii portret cheloveka na Severe*. [Environmental portrait of a man in the North]. Moscow, 1997, 208 p.
2. Gudkov A. B. *Fiziologicheskaya kharakteristika netraditsionnykh rezhimov organizatsii truda v Zapolyar'e (avtoref. dok. dis.)* [Physiological characteristics of non-traditional modes of work organization in the Arctic (Author's Abstract of Doctoral Thesis)]. Arkhangelsk, 1996, 32 p.

3. Ivashchenko I. N., Kirillova L. I., Kalina O. N., Zamyatina G. S. Study of interrelation of properties of cover materials and heat-protective properties of package of materials of heat-insulated clothing. *Shveinaya promyshlennost'* [Sewing industry]. 2011, 1, pp. 32-33. [in Russian]
4. Ivashchenko I. N., Belyaeva S. A. *Proektirovanie teplozashchitnoi spetsial'noi odezhdy dlya rabotnikov neftedobyvayushchei otrasli* [Planning of the heat-protective special clothing for the workers of oil-extracting industry]. Krasnodar, 2012, 110 p.
5. Ivashchenko I. N., Shmal'ko S. P. Regressive models and optimization of the total thermal resistance of integumentary materials of clothing for oilmen. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Problems of modern science and education]. 2014, 3, pp. 1–7. URL: <http://www.science-education.ru/117-13517> (accessed 07.05.2015)
6. Karpin V. A., Gudkov A. B., Katyuhin V. N. Monitoring of the incidence of indigenous people of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2003, 3, pp. 3-8. [in Russian]
7. Kubushka O. N., Gudkov A. B. The structure features of vital lung capacity in northerners of high school age. *Vestnik Pomorskogo universiteta. Seriya: Fiziologicheskie i psihologo-pedagogicheskie nauki* [Pomor University Bulletin. Series: Physiological, psychological and pedagogical sciences]. 2003, 1, pp. 42-50. [in Russian]
8. Nikitin Yu. P., Khasnulin V. I., Gudkov A. B. Contemporary problems of Northern medicine and researchers' efforts to solve them. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Seriya: Mediko-biologicheskie nauki* [Vestnik of Northern (Arctic) Federal University. Series: Medical and biological sciences]. 2014, 3, pp. 63-72. [in Russian].
9. Rozanova E. A., Moskalenko N. G., Streltsov I. P. Development of mathematical model for determination of parameters of close system "A man is a sportswear". *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental researches]. 2013, 11, pp. 1142-1146. [in Russian]
10. Sarychev A. S., Alekseenko V. D., Simonova N. N., Gudkov A. B., Degteva G. N. *Meditinskii akademicheskii zhurnal* [Academic Medical Journal]. 2007, 7 (4), pp. 113-119. [in Russian]
11. Chashhin V. P., Sjurin S. A., Gudkov A. B., Popova O. N., Voronin A. Ju. Influence of industrial pollution of ambient air on health of workers engaged into open air activities in cold conditions. *Meditcina truda i promyshlennaya ekologiya* [Occupational Medicine and Industrial Ecology]. 2014, 9, pp. 20-26. [in Russian]
12. Ali Afzal, Tanveer Hussain, Muhammad Mohsin, Abher Rasheed, Sheraz Ahmad. Statistical models for predicting the thermal resistance of polyester/cotton blended interlock knitted fabrics. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014, 85, pp. 40-46.
13. Apurba Das, Ramasamy Alagirusamy and Pavan Kumar. Study of Heat Transfer Through Multilayer Clothing Assemblies: A Theoretical Prediction. *Autex Research Journal*. 2011, 11 (2), pp. 40-46. Available at: http://www.autexrj.org/No2-2011/5_0013_11.pdf (accessed 07.05.2015).
14. Lilioara Surdu, Carmen Ghituleasa, Carmen Mihai, Alexandra Ene. Comfort properties of multilayer textile materials for clothing. *Industria Textila*. 2013, 64 (2), pp. 75-79.
15. Xiaoming Qian and Jintu Fan. Prediction of Clothing Thermal Insulation and Moisture Vapour Resistance of the Clothed Body Walking in Wind. *Annals of Occupational Hygiene*. 2006, 50 (8), pp. 833-842.

Контактная информация:

Шмалько Светлана Петровна — кандидат педагогических наук, доцент кафедры математики и вычислительной техники НАН ЧОУ ВПО «Академия маркетинга и социально-информационных технологий», г. Краснодар

Адрес: 350010, г. Краснодар, ул. Зиповская, 5
E-mail: shmalko_sis@mail.ru