

Научная статья  
УДК 681.7  
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.81.26.014

## Математическое моделирование оптико-пирометрического газоанализатора

*Светлана Александровна Гарелина*<sup>1</sup>

*Роберт Артушевич Захарян*<sup>2</sup>

*Константин Павлович Латышенко*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБВОУ ВО «Академия гражданской защиты МЧС России», Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт химической физики им. А.Б. Налбандяна НАН Республики Армения, Ереван

*Автор ответственный за переписку: Константин Павлович Латышенко, kplat@mail.ru*

**Аннотация.** В данной статье представлен анализ инновационного подхода к определению концентрации газов в среде, основанного на оптико-абсорбционном методе. Суть инновации заключается в замене традиционного оптико-акустического приемника на пирометрический датчик, который реагируя на тепловое излучение, позволяет регистрировать изменения температуры, вызванные поглощением света анализируемым газом. Такой подход открывает новые перспективы в области газового анализа, поскольку он может обладать рядом преимуществ перед существующими технологиями, хотя требует более глубокого изучения.

Для комплексной оценки эффективности и точности разработанного прибора проведено масштабное математическое моделирование. Полученные результаты наглядно демонстрируют существенную нелинейную зависимость выходного сигнала газоанализатора от концентрации определяемого вещества. Эта нелинейность, являясь специфической чертой данного устройства, требует особого внимания при обработке данных и построении калибровочных кривых. Важно отметить, что учет этой нелинейности является критическим фактором для обеспечения высокой точности измерений.

Статья представляет собой всестороннее и глубокое исследование нового оптико-пирометрического газоанализатора, включающее разработку, детальное математическое моделирование, анализ нелинейных характеристик и всестороннюю оценку погрешностей. Результаты исследования имеют значительное значение для развития технологий газового анализа и могут найти широкое применение в различных областях, от мониторинга окружающей среды до промышленного контроля технологических процессов. Представленные данные позволяют оценить потенциальные преимущества и ограничения нового метода, открывая новые пути для дальнейших исследований и совершенствования технологии.

**Ключевые слова:** количественный анализ, концентрация вещества, газоанализатор, оптико-пирометрический газоанализатор, математическая модель, статическая характеристика, погрешность

**Для цитирования:** Гарелина С.А., Захарян Р.А., Латышенко К.П. Математическое моделирование оптико-пирометрического газоанализатора // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 1(36). С. 150-156. <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.81.26.014>

Original article

## Mathematical modeling of optical-pyrometric gas analyzer

*Svetlana A. Garelina*<sup>1</sup>

*Robert A. Zakharyan*<sup>2</sup>

*Konstantin P. Latyshenko*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*FGBVOU VO «Academy of Civil Defence of the Ministry of Emergency Situations of Russia»,  
Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Chemical Physics named after A.B. Nalbandyan, National Academy of Sciences of the  
Republic of Armenia. A.B. Nalbandyan Institute of Chemical Physics, National Academy of Sciences  
of the Republic of Armenia, Yerevan*

**Corresponding author:** Konstantin P. Latyshenko, [kplat@mail.ru](mailto:kplat@mail.ru)

**Abstract.** This paper analyzes an innovative approach to determining the concentration of gases in the environment based on the optical-absorption method. The essence of the innovation is to replace the traditional optical-acoustic receiver with a pyrometric sensor, which reacting to thermal radiation, allows to register temperature changes caused by light absorption by the analyzed gas. This approach opens new perspectives in the field of gas analysis, as it may have a number of advantages over existing technologies, although it requires more in-depth study.

Large-scale mathematical modeling has been carried out to comprehensively evaluate the efficiency and accuracy of the developed instrument. The obtained results clearly demonstrate a significant nonlinear dependence of the output signal of the gas analyzer on the concentration of the determined substance. This nonlinearity, being a specific feature of this device, requires special attention during data processing and calibration curves construction. It is important to note that consideration of this nonlinearity is a critical factor in ensuring high accuracy of measurements.

The paper presents a comprehensive and in-depth study of a new optical-pyrometric gas analyzer, including design, detailed mathematical modeling, analysis of nonlinear characteristics, and comprehensive error evaluation. The results of the study are of significant importance for the development of gas analysis technologies and may find wide application in various fields, from environmental monitoring to industrial process control. The presented data allow us to evaluate the potential advantages and limitations of the new method, opening new avenues for further research and technology improvement.

**Keywords:** quantitative analysis, substance concentration, gas analyser, optical-pyrometric gas analyser, mathematical model, static characteristic, uncertainty

**For citation:** Garelina S.A., Zakharyan R.A., Latyshenko K.P. Mathematical modeling of an optical pyrometric gas analyzer // Siberian Fire and Rescue Bulletin. 2025. № 1(36). С. 150-156. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.81.26.014>

### Введение

Хорошо известно, что доля импортной продукции на рынке газоанализаторов всегда была высокой. Например, до 2022 года более 71 % рынка составляла продукция зарубежных производителей [1]. Сегодня, когда из-за санкций образовался дефицит предложений газоанализаторов в России, работа по импортозамещению стала актуальной.

Надо отметить, что газоанализаторы являются наукоемкой продукцией. Срок их разработки может составлять несколько лет, они сложны, дороги, а рынок их сбыта невелик.

Стоит отметить, что в МЧС России широко используют газоанализатор «Колион», в том числе для экспертиз пожаров. Однако, согласно [2], испытания показывают, что вследствие недостаточной селективности этот прибор реагирует на газообразные продукты пиролиза органических материалов и срабатывает иногда в отсутствие средств поджога.

Таким образом, существует актуальная задача по разработке газоанализаторов в России с высокой селективностью, позволяющих определять концентрации большого количества компонентов газовой смеси.

В работе [3] показано, что в настоящее время все шире за рубежом и в России стали применять газоанализаторы с твердотельными приемниками излучения. В [4] представлен оптико-пирометрический газоанализатор, в котором вместо традиционного оптико-акустического приемника использован пирометрический датчик (Рис.1). Однако, этот газоанализатор содержит электродвигатель, вращающиеся части, дорогое и сложное в исполнении зеркало-модулятор и поэтому характеризуется высокой стоимостью, большим энергопотреблением и недостаточной надежностью.

В статье описан новый оптико-пирометрический газоанализатор, который лишен указанных недостатков. Принцип его действия основан на избирательном поглощении газовой компонентой ИК излучения в соответствующих спектральных интервалах, которое регистрируется пирометрическим датчиком.

На Рис.1 приведена функциональная схема предложенного газоанализатора. В газоанализаторе ИК излучение от источника 1 двумя сферическими отражателями 2 и 2' последовательно фокусируют на пирометрическом датчике 3 и измерительной кювете 4 с анализируемым газом. После прохождения слоя анализируемой газа ИК излучение отражается от сферического зеркала измерительной кюветы 4 и, повторно пройдя слой газа, фокусируется на пирометрическом датчике 3, который преобразует ИК излучение в термо ЭДС, пропорциональную  $I_0$  или  $I$ , который обрабатывает блок 5 и микропроцессор 6. После этого сигнал с микропроцессора, пропорциональный концентрации анализируемого компонента газа визуализируется на вторичном приборе 9.

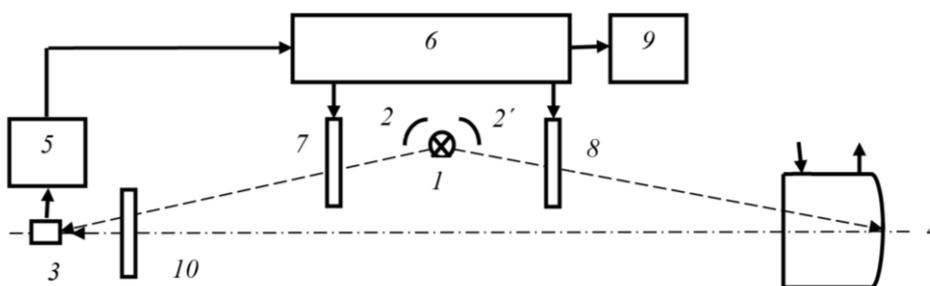


Рис.1. Функциональная схема оптико-пирометрического газоанализатора: 1 – источник ИК излучения; 2 – сферический отражатель; 3 – пирометрический приемник; 4 – измерительная кювета; 5 – блок обработки сигнала; 6 – микропроцессор; 7, 8 – световой затвор; 9 – вторичный прибор; 10 – узкополосный фильтр

Когда открыт световой затвор 2 и закрыт затвор 2', ИК излучение попадает на пирометрический датчик 3, который измеряет величину  $I_0$  (Рис.2).

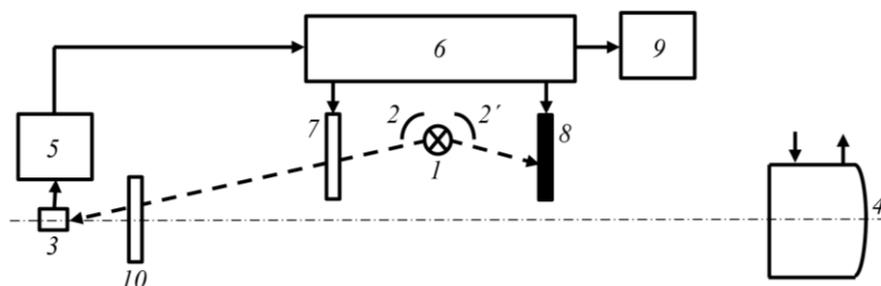


Рис.2. Режим измерения величины  $I_0$

Когда закрыт световой затвор 2 и открыт затвор 2', ИК излучение дважды проходит через измерительную кювету 4 и попадает на пирометрический датчик 3, который измеряет величину  $I$  (Рис.3).

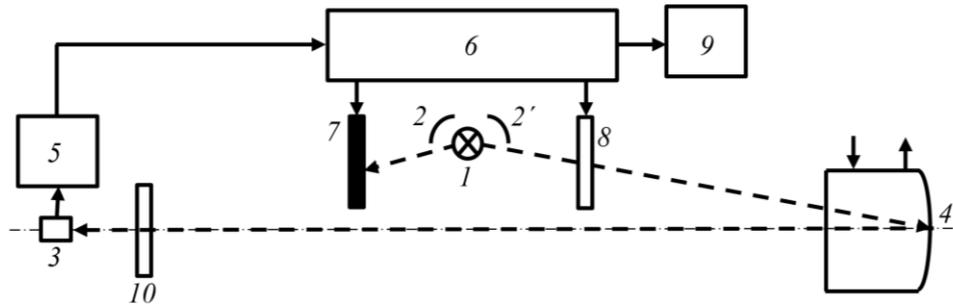


Рис.3. Режим измерения величины  $I$

В основе разработки математической модели оптико-пирометрического газоанализатора использован известный закон Бугера-Ламберта-Бера:

$$I = I_0 e^{-\varepsilon \lambda C l} \quad (1)$$

$$I = I_0 (1 - 10^{-k l C}) = 2,303 k l C I_0, \dots (2,303 k l C \ll 1) \quad (2)$$

откуда с использованием уравнения теплового потока:

$$q = \varepsilon \sigma \left[ \frac{T_0}{100} \right]^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (3)$$

получено следующее соотношение:

$$T^4 = T_0^4 e^{-\varepsilon \lambda C l} \quad (4)$$

где:  $I_0, I$  – сила света до и после поглощения;  $\varepsilon_\lambda$  – коэффициент поглощения измеряемым газом на длине волны излучения  $\lambda$ ;  $l$  – длина пути света через кювету;  $C$  – концентрация измеряемого газа;  $q$  – тепловой поток;  $\varepsilon$  – коэффициент излучательной способности;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T_0, T$  – температура ИК излучателя и потока после прохождения кюветы, соответственно.

Стоит отметить, что величина интенсивности силы света  $I$  пропорциональна концентрации измеряемого газа  $C$  согласно (2).

Тогда математическая модель оптико-пирометрического газоанализатора примет вид:

$$E = KM(1 - r)(A_1 T_0^4 - A_2 T^4) e^{-\varepsilon \lambda C l} \quad (5)$$

где:  $E$  – ЭДС на пирометрическом приемнике (батарея термопар);  $K$  – коэффициент усиления блока обработки сигнала;  $r$  – потери на отражение от поверхностей оптических элементов (линза, зеркало, окошко приемника);  $M$  – коэффициент, зависящий от температуры пирометрического приемника;  $A_1, A_2$  – коэффициенты поглощения в оптических элементах.

На Рис.4 приведена статическая характеристика оптико-пирометрического газоанализатора  $E = f(C)$ . Из (5) и рис. 4 видно, что она имеет резко нелинейный характер.

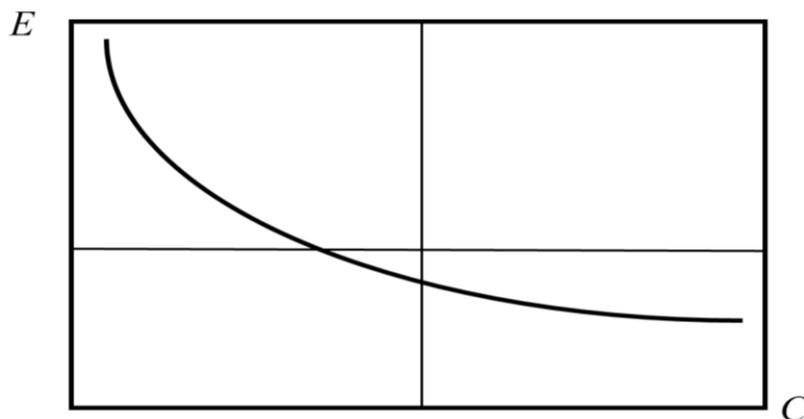


Рис.4. Статическая характеристика оптико-пирометрического газоанализатора

В Табл.1 приведены результаты математического моделирования метрологических характеристик предложенного газоанализатора: чувствительность (6), абсолютная (7), относительная (8) и средняя квадратическая (9) погрешность.

**Табл.1. Метрологические характеристики оптико-пирометрического газоанализатора**

Чувствительность $S$	$S = -KM(1-r)(A_1T_0^4 - A_2T^4)\varepsilon_\lambda l e^{-\varepsilon_\lambda Cl} \quad (6)$
Абсолютная погрешность $\Delta U$	$\Delta E = M(A_1T_0^4 - A_2T^4)e^{-\varepsilon_\lambda Cl}\Delta K + K(A_1T_0^4 - A_2T^4)e^{-\varepsilon_\lambda Cl}\Delta M +$ $+ KMT_0^4 e^{-\varepsilon_\lambda Cl}\Delta A_1 + KMT^4 e^{-\varepsilon_\lambda Cl}\Delta A_2 + KMA_14T_0^3 e^{-\varepsilon_\lambda Cl}\Delta T_0 +$ $KMA_24T^3 e^{-\varepsilon_\lambda Cl}\Delta T + KM(A_1T_0^4 - A_2T^4)Cle^{-\varepsilon_\lambda Cl}\Delta\varepsilon_\lambda +$ $+ KM(A_1T_0^4 - A_2T^4)\varepsilon_\lambda Ce^{-\varepsilon_\lambda Cl}\Delta l + \xi, \quad (7)$ <p>где: <math>\Delta K, \Delta M, \Delta A_1, \Delta A_2, \Delta T_0, \Delta T, \Delta\varepsilon_\lambda, \Delta l, \xi</math> – абсолютные неконтролируемые изменения соответствующих неинформативных параметров (из-за малости величины <math>r</math> было принято, что <math>1 - r \approx 1</math>)</p>
Относительная погрешность	$\delta E = \delta K + \delta M + \frac{A_1T_0^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \delta A_1 + \frac{A_2T^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \delta A_2 +$ $+ \frac{4T_0^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \delta T_0 + \frac{4T^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \delta T + \varepsilon_\lambda Cl \delta\varepsilon_\lambda +$ $+ \varepsilon_\lambda Cl \delta l + \xi, \quad (8)$ <p>где: <math>\delta K, \delta M, \delta r, \delta A_1, \delta A_2, \delta T_0, \delta T, \delta\varepsilon_\lambda, \delta l, \xi</math> – относительные изменения соответствующих неинформативных параметров</p>
Среднеквадратическая погрешность	$\delta E = \delta K + \delta M + \frac{A_1T_0^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \delta A_1 + \frac{A_2T^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \delta A_2 +$ $+ \frac{4T_0^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \delta T_0 + \frac{4T^4}{A_1T_0^4 - A_2T^4} \delta T + \varepsilon_\lambda Cl \delta\varepsilon_\lambda +$ $+ \varepsilon_\lambda Cl \delta l + \sigma_\xi, \quad (9)$ <p>где: <math>\sigma_K, \sigma_M, \sigma_r, \sigma_{A1}, \sigma_{A2}, \sigma_{T0}, \sigma_T, \sigma_{\varepsilon_\lambda}, \sigma_l, \sigma_\xi</math> – среднеквадратические изменения соответствующих неинформативных параметров</p>

На Рис.5 приведено распределение чувствительности оптико-пирометрического газоанализатора.

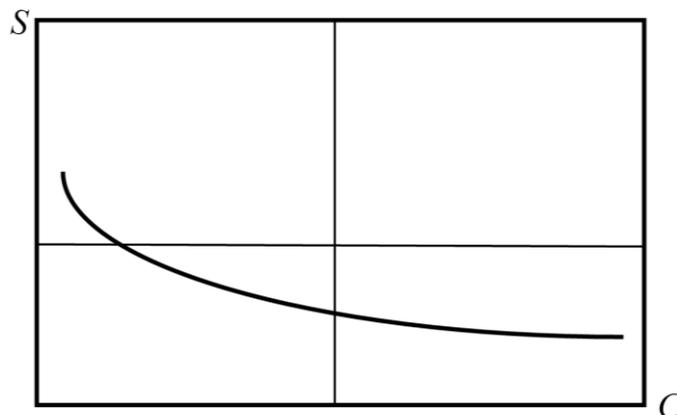


Рис.5. Распределение чувствительности оптико-пирометрического газоанализатора

Из Рис.5 и (6) следует, что чувствительность оптико-пирометрического газоанализатора также не линейна.

Нелинейность статической характеристики и его чувствительной характеристики являются недостатком любого средства измерений. Устранить это принципиальный недостаток, связанные с нелинейностью закона Бугера-Ламберта-Бера, лежащего в основе

работы пирометра, можно либо сузив диапазон его измерений, либо использовав линеаризатор, либо микропроцессор.

Из анализа погрешностей (7), (8) и (9) следует, что они содержат аддитивную (первое, второе, седьмое, восьмое и девятое) и мультипликативную (третье, четвертое, пятое и шестое) составляющие. Из этого следует, что уменьшить погрешность измерения концентрации анализируемого газа можно за счет аргументированного подбора соответствующих компонентов схемы и режимов их работы.

## Выводы

Предложен оптико-пирометрический газоанализатор, защищенный патентом РФ на полезную модель) разъяснен принцип его работы.

Получены аналитические математические модели статической характеристики пирометра и его чувствительности, обладающие существенной нелинейностью.

Показаны пути снижения нелинейности статической характеристики пирометра и уменьшения его погрешности.

Показано, что оптико-пирометрический газоанализатор обладает улучшенными метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

## Список источников

1. Импортозамещение газоанализаторов: есть ли успехи? // Русь Турбо. – 2024. – URL: <https://nprom.online/market/importozameshhenie-gazoanalizatorov-est-li-uspehi/?ysclid=lo6t340wlj475275532> (дата обращения 01.10.2024).
2. Чешко И.Д. Возможности использования газоанализаторов при расследовании пожаров // Сб. ст. «Расследование пожаров». – М.: ВНИПО МЧС России. – 2005. – Вып. 1. – С. 118 – 129.
3. Гарелина С.А. Научно-методические основы обоснования рациональных параметров системы технических средств для предупреждения чрезвычайных ситуаций на промышленном объекте: дис. докт. техн. наук: 3.2.6. – Химки: АГЗ МЧС России. – 2024. – С. 352.
4. Патент на полезную модель RU 205 509 U1. Газоанализатор пирометрический (с твердотельным датчиком): № 2020138144: заявл. 2020.11.20; опубл. 2021.07.19 / Захарян Р.А., Остапчук Е.Е., Гарелина С.А. и др.; заявитель, патентообладатель ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС.
5. Бурькин А.В. Многоканальные переносные инфракрасные газоанализаторы для контроля транспортных выбросов: Дис. канд. техн. наук: 05.11.13: Москва. – 2002. – С. 170.
6. Саати Т., Томас Л. Принятие решений: Метод анализа иерархий / Саати Т., Пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. - Москва: Радио и связь. – 1993. – С. 314.
7. Китайцева Е.Х. Автоматизация метода анализа иерархий [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / Китайцева Е.Х. – Москва: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – 2020. – С. 52.
8. Информационные технологии и вычислительные системы: Математическое моделирование. Вычислительные системы. Нанотехнологии. Прикладные аспекты информатики / Под ред. С.В. Емельянова. - М.: Ленанд. – 2012. – С. 108.
9. Искусственный интеллект и принятие решений: Интеллектуальный анализ данных. Моделирование поведения. Когнитивное моделирование. Моделирование и управление / Под ред. С.В. Емельянова. - М.: Ленанд. – 2012. – С. 108.

## References

1. Import substitution of gas analysers: are there any successes? // Rus Turbo. - 2024. - URL: <https://nprom.online/market/importozameshhenie-gazoanalizatorov-est-li-uspehi/?ysclid=lo6t340wlj475275532> (date of address 01.10.2024). Cheshko, I.D. Possibilities of using gas analyzers in the investigation of fires / Collection of articles "Investigation of fires". Moscow: VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia. – 2005. – Issue 1. – pp. 118-129.

2. Garelina S.A. Scientific and methodological foundations of substantiation of rational parameters of the system of technical means for the prevention of emergency situations at an industrial facility: dis. doct. Technical sciences: 3.2.6. – Khimki: AGZ of the Ministry of Emergency Situations of Russia. – 2024. – pp. 352.
3. Garelina S.A. Scientific and methodological bases of substantiation of rational parameters of the system of technical means for prevention of emergency situations at the industrial facility: Ph. Sci. (Doctor of Technical Sciences): 3.2.6. - Khimki: AGZ MES of Russia. – 2024. – pp. 352.
4. Utility model patent RU 205 509 U1. Pyrometric gas analyzer (with solid-state sensor): №. 2020138144: application 2020.11.20: published 2021.07.19 / R.A. Zakharyan, E.E. Ostapchuk, S.A. Garelina et al.; applicant, patent holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education in the Ministry of Emergency Situations.
5. Burykin A.V. Multichannel portable infrared gas analyzers for transport emissions control: Cand. Candidate of Technical Sciences: 05.11.13: Moscow. – 2002. – pp. 170.
6. Saaty T, Thomas L. Decision Making: A Method for Analyzing Hierarchies / Saaty T., Per. with Engl. R.G. Vachnadze. – Moscow: Radio and Communication. – 1993. – pp. 314.
7. Kitaitseva E.H. Automation of the method of hierarchy analysis [Electronic resource]: textbook / Kitaitseva E.H. – Moscow: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, National Research Moscow State Construction University. – 2020. – pp. 52.
8. Information Technologies and Computing Systems: Mathematical Modeling. Computational systems. Nanotechnologies. Applied aspects of informatics / Edited by Emelyanov S.V. – Moscow: Lenand. – 2012. – pp. 108.
9. Artificial intelligence and decision making: Intelligent data analysis. Behavior modeling. Cognitive modeling. Modeling and management / Edited by S.V. Emelyanov. – Moscow: Lenand. – 2012. – pp. 108.

#### Информация об авторах

С.А. Гарелина – кандидат технических наук, доцент

Р.А. Захарян – кандидат технических наук

К.П. Латышенко – доктор технических наук, профессор

#### Information about the author

S.A. Garelina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

R.A. Zakharyan – Candidate of Technical Sciences

K.P. Latyshenko – Doctor of Technical Sciences, Professor

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.03.2025, одобрена после рецензирования 10.03.2025, принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 05.03.2025, approved after reviewing 10.03.2025, accepted for publication 20.03.2025.