

УДК 539.21 © И.И. Босиков<sup>1</sup>, И.В. Силаев<sup>2</sup>, А.В. Кузина<sup>3</sup>,  
А.А. Мишедченко<sup>3</sup>, 2025

UDC 539.21 © I.I. Bosikov<sup>1</sup>, I.V. Silaev<sup>2</sup>, A.V. Kuzina<sup>3</sup>,  
A.A. Mishedchenko<sup>3</sup>, 2025

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(ГТУ)», 362021, г. Владикавказ, Россия

<sup>1</sup> North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy  
(State Technological University), Vladikavkaz, 362021, Russian Federation

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский государственный университет  
имени К.Л. Хетагурова», 362025, г. Владикавказ, Россия

<sup>2</sup> North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov,  
Vladikavkaz 362025, Russian Federation

<sup>3</sup> ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»,  
107023, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation

✉ e-mail: igor.boss.777@mail.ru

✉ e-mail: igor.boss.777@mail.ru

# Комплексный анализ свойств критерия эффективности задачи синтеза технических систем воздухообеспечения на угольных шахтах

## Comprehensive analysis of the properties of the efficiency criterion for the synthesis of technical air supply systems for coal mines

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-5-128-131>

### **БОСИКОВ И.И.**

Канд. техн. наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело»  
ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский  
горно-металлургический институт (ГТУ)»,  
362021, г. Владикавказ, Россия,  
e-mail: igor.boss.777@mail.ru

### **СИЛАЕВ И.В.**

Канд. техн. наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Физика и астрономия»,  
ФГБОУ ВО «Северо-Осетинский государственный  
университет имени К.Л. Хетагурова»,  
362025, г. Владикавказ, Россия

### **КУЗИНА А.В.**

Доцент кафедры «Промышленное,  
гражданское и подземное строительство»  
ФГАОУ ВО «Московский  
политехнический университет»,  
107023, г. Москва, Россия,  
e-mail: 1314598@mail.ru

*В условиях современного развития горнодобывающей отрасли качество воздуха и безопасность в угольных шахтах становятся критически важными факторами, влияющими на эффективность и безопасность технологических процессов. Применение критерия эффективности задачи синтеза технических систем воздухообеспечения на угольных шахтах позволяет улучшить показатели воздухообеспечения, что, в свою очередь, способствует устойчивому развитию горнодобывающей отрасли. Важным является исследование характерных свойств геометрической интерпретации критерия эффективности комплексной задачи синтеза технических систем воздухообеспечения, на основе которой можно осуществить правильный выбор наиболее подходящих методов определения его глобального экстремума. Цель исследований заключается в проведении комплексного анализа свойств критерия эффективности задачи синтеза технических систем воздухообеспечения угольных шахт. Практическое значение работы проявляется в разработке критерия эффективности задачи синтеза технических систем воздухообеспечения на угольных шахтах, который представляет собой инновационный инструментарий, объединяющий научные и практические достижения. Предложенный критерий эффективности способствует оптимизации процессов, повышению эффективности и качества воздухообеспечения в угольной промышленности.*

**Ключевые слова:** угольные шахты, вентиляционная установка, система воздухообеспечения, критерий эффективности, загазованность, депрессия, конфигурация системы, интенсивность отказов.

**Для цитирования:** Комплексный анализ свойств критерия эффективности задачи синтеза технических систем воздухообеспечения на угольных шахтах / И.И. Босиков, И.В. Силаев, А.В. Кузина и др. // Уголь. 2025;(5):128-131. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-128-131.

### Abstract

*In the conditions of modern development of the mining industry, air quality and safety in coal mines are becoming critical factors affecting the efficiency and safety of technological processes. Application of the efficiency criterion of the problem of synthesis of technical air supply systems in coal mines allows to improve the air supply indicators, which, in turn, contributes to the sustainable development of the mining industry. It is important to study the characteristic properties of the geometric interpretation of the efficiency criterion of the complex problem of synthesis of technical air supply systems, on the basis of which it is possible to make the correct choice of the most suitable methods for determining its global extremum. The purpose of the research is to carry out a comprehensive analysis of the properties of the efficiency criterion of the problem of synthesis of technical air supply systems in coal mines. The practical significance of the work is manifested in the development of the efficiency criterion of the problem of synthesis of technical air supply systems in coal mines, which is an innovative tool that combines scientific and practical achievements. The proposed efficiency criterion contributes to the optimization of processes, increasing the efficiency and quality of air supply in the coal industry.*

### Keywords

*Coal mines, ventilation system, air supply system, efficiency criterion, gas contamination, depression, system configuration, failure rate.*

### For citation

Bosikov I.I., Silaev I.V., Kuzina A.V., Mishedchenko A.A. Comprehensive analysis of the properties of the efficiency criterion for the synthesis of technical air supply systems for coal mines. *Ugol*. 2025;(5):128-131. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-128-131.

### МИШЕДЧЕНКО А.А.

Старший преподаватель, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», 107023, г. Москва, Россия, e-mail: a.a.mishedchenko@mospolytech.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Решение задачи комплексного синтеза технических систем воздухообеспечения (ТСВ) [1, 2, 3], заключается в определении глобального экстремума критерия эффективности (КЭ) для множества синтезируемых ТСВ [4, 5]. Важным является исследование характерных свойств геометрической интерпретации КЭ комплексной задачи синтеза ТСВ, на основе которой можно осуществить правильный выбор наиболее подходящих методов определения его глобального экстремума [6, 7, 8].

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Цель данной работы заключается в проведении комплексного анализа свойств критерия эффективности задачи синтеза технических систем воздухообеспечения угольных шахт [9, 10, 11]. Используются следующие обозначения и предположения, которые ранее рассматривались в работах [12, 13, 14]: синтезируемая ТСВ состоит из совокупности внутренней  $C^{\text{int}}$  и внешней  $C^{\text{ext}}$  подсистем;  $C^{\text{int}}$  состоит из  $N_{\text{BV}}$ , а  $C^{\text{ext}}$  соответственно из  $R_{\text{II}}$  положительных и  $R_{\text{O}}$

отрицательных ПИД-регуляторов, причем  $R_n \leq m, R_o \leq n$ , где  $n, m$  – количество рабочих зон синтезируемой ТСВ; основные оптимизирующие параметры при решении исходной задачи синтеза ТСВ изменяют свои значения в областях:

$$\Omega_Q = \left\{ Q_i \mid \underline{Q}_i \leq Q_i \leq \bar{Q}_i \right\}, \Omega_\Delta [0; 0.8], \quad (1)$$

где  $\bar{Q}_i = \min_{i=1,2,\dots,m} \{H_i\}, \min_{i=1,2,\dots,n} \{C_i\}$ ;

$$\underline{Q}_i = \arg \left\{ \max \left\{ \sum_{i=1}^m E\left(\frac{H_i}{Q}\right), \sum_{j=1}^n E\left(\frac{C_j}{Q}\right) \right\} \right\} \leq N_{\max};$$

$N_{\max}$  – максимально допустимая размерность локальной задачи синтеза ТСВ.

Исходная комплексная задача синтеза ТСВ:

$$\begin{aligned} (Q_{\text{opt}}, T_{\text{opt}}) \in \text{Arg} \{ \min_{Q \in \Omega_Q} \min_{T \in \Omega_\Delta} \{ \Pi(Q, T) \} = \\ = \min_{X \in \Omega_X(Q, T)} \{ \partial \mathfrak{R}^{\text{int}}(Q, X) + \mathfrak{R}^{\text{ext}}(Q) + \mathfrak{E}_n(Q) + \mathfrak{E}_x(Q) \} \}, \quad (2) \end{aligned}$$

где  $\Pi(Q, T)$  – КЭ синтезируемой ТСВ;  $\mathfrak{R}^{\text{int}}(Q, X)$  и  $\mathfrak{R}^{\text{ext}}(Q)$  – капитальные затраты на сооружение  $C^{\text{int}}$  и  $C^{\text{ext}}$ ;  $\mathfrak{E}_n(Q)$  и  $\mathfrak{E}_x(Q)$  – годовые эксплуатационные затраты для ГВУ, входящих в  $C^{\text{ext}}$ ;  $\Omega_{X(Q, T)}$  – область допустимых матриц назначения для  $C^{\text{int}}$ , определенная на конкретных значениях  $Q \in \Omega_Q$  и  $T \in \Omega_\Delta$ ;  $\delta$  – норма амортизации и срока окупаемости ТСВ.

Проводим оценку КЭ  $\Pi(Q, T)$  в пространстве множества  $\Omega_Q$  при  $T \in \Omega_\Delta$ . Примем:

$$\begin{aligned} \tilde{\Pi}(Q) = \Pi(Q, T); \tilde{x}^{\text{int}}(Q) = \min_{X \in \Omega_X(Q, T)} \partial \mathfrak{R}^{\text{int}}(Q, X) \text{ для } T \in \Omega_\Delta; \\ \mathfrak{R}^{\text{ext}}(Q) = \partial \mathfrak{R}^{\text{ext}}(Q); \tilde{\mathfrak{E}}(Q) = \mathfrak{E}_n(Q) + \mathfrak{E}_x(Q), \end{aligned}$$

тогда при  $T \in \Omega_\Delta$  задача (2) имеет вид:

$$Q_{\text{opt}}(T) \in \text{Arg} \min \{ \tilde{\Pi}(Q) = \tilde{\mathfrak{R}}^{\text{int}}(Q) + \tilde{\mathfrak{R}}^{\text{ext}}(Q) + \tilde{\mathfrak{E}}(Q) \}. \quad (3)$$

**Утверждение 1.** Значения  $\Omega_Q$  технической нагрузки  $Q$  ВУ формируются из подмножеств  $P_N$  ( $N > 1$ ), которые соответствуют  $Q$ , при которых  $N$  ВУ – const, т.е.:

$$\begin{aligned} \exists d_N, d_N, \xi: \{ P_N = \{ Q \mid d_N + \xi \leq Q \leq d_N \} \} \mathfrak{N} \\ \mathfrak{N} \{ \forall Q \in P_N; N = \text{const} \} \mathfrak{N} \\ \mathfrak{N} \{ P_{N-1} \cap P_N = \Phi, \forall N \} \mathfrak{N} \{ \bigcap_N P_N = \Omega_Q \}. \quad (4) \end{aligned}$$

Доказательство.

Согласно утверждению 1:

$$N = N(Q_i) = \min \left\{ \sum_{i=1}^m E\left(\frac{H_i}{Q_i}\right), \sum_{j=1}^n E\left(\frac{C_j}{Q_j}\right) \right\},$$

где  $E(b) \leq b, H_i(C_j)$  – энтальпия. Т.к.  $Q > 0, N > 0$ , то из выражения (5) следует:

$$\left\{ \frac{1}{N+1} \min \left\{ \sum_{i=1}^m H_i, \sum_{j=1}^n C_j \right\} \leq Q \leq \frac{1}{N} \min \left\{ \sum_{i=1}^m H_i, \sum_{j=1}^n C_j \right\} \right\}.$$

Далее можно осуществить исследование вида функции  $\Pi(Q)$  и ее составляющих функций  $\mathfrak{R}^{\text{int}}(Q), \mathfrak{R}^{\text{ext}}(Q), \tilde{\mathfrak{E}}(Q)$  в области  $\Omega_Q$  путем изучения их характеристик в подобластях  $P_N$  ( $N > 1$ ).

**Утверждение 2.** В области  $P_N \in \Omega_Q$  функции  $\mathfrak{R}^{\text{int}}(Q), \mathfrak{R}^{\text{ext}}(Q), \tilde{\mathfrak{E}}(Q)$  и, следовательно,  $\tilde{\Pi}(Q)$  являются дифференцируемыми, т.е. имеют конечные производные первого

порядка. Доказательство свойства 2 не представляет сложности, но следует отметить, что не исключается случай, когда внутри множества  $P_N$  существует такая точка  $\tilde{Q}$ , для которой функции  $\mathfrak{R}^{\text{int}}(Q), \mathfrak{R}^{\text{ext}}(Q), \tilde{\mathfrak{E}}(Q)$  имеют только конечные односторонние производные. Это обусловлено тем, что коэффициенты стоимости ВУ могут быть заданы дискретно в табличном виде, зависящими от поверхности ВУ (значит, и от  $Q$ ).

**Утверждение 3.** В области  $P_N \in \Omega_Q$ : 3а)  $\mathfrak{R}^{\text{int}}(Q)$  – монотонно возрастающая и вогнутая функции от  $Q$ ;  $\mathfrak{R}^{\text{ext}}(Q)$  является монотонно убывающей функцией от  $Q$ .

**Доказательство.** При заданных ВУ( $N$ ) и коэффициентах стоимости ВУ  $a_i = a_i(Q), b_i = b_i(Q)$  функция  $\mathfrak{R}^{\text{int}}(Q)$  определяется по соотношению:

$$\mathfrak{R}^{\text{int}}(Q) = \sum_{i=1}^N a_i F_i(Q)^{b_i} = \sum_{i=1}^N a_i \left( \frac{Q}{\Delta t_i^{\text{cp}} \mathfrak{R}_i} \right)^{b_i},$$

где  $\Delta t_i^{\text{cp}}$  и  $\mathfrak{R}_i$  – средняя движущая сила и коэффициент воздухораспределения  $i$ -го ВУ.

Если:

$$\frac{d\mathfrak{R}^{\text{ext}}(Q)}{dQ} = \sum_{i=1}^{N_x} \frac{d\mathfrak{R}^{\text{ext}}}{dq_i^x} \left( \frac{dQ}{dq_i^x} \right)^{-1} + \sum_{i=1}^{N_n} \frac{d\mathfrak{R}^{\text{ext}}}{dq_j^n} \left( \frac{dQ}{dq_j^n} \right)^{-1} \leq 0.$$

Получим:

$$\begin{aligned} \left\{ A_i^x \geq 0, A_j^n \geq 0, 0 \leq (B_i^x, B_j^n) \leq 1 \right\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \left\{ \frac{d\mathfrak{R}^{\text{ext}}}{dq_i^x} \geq 0, \frac{d\mathfrak{R}^{\text{ext}}}{dq_j^n} \leq 0 \right\}. \end{aligned}$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, N_x, j = 1, 2, \dots, N_n.$$

Из утверждения 1 следует  $\{ \forall Q \in P_N, N = \text{const} \} \Rightarrow h = CQ, C = \text{const} (C \geq 0)$ .

**Утверждение 4.** В области  $P_N \subset \Omega_Q$  функция  $\tilde{\Pi}(Q)$  имеет по крайней мере один минимум, координата которого  $Q^*$  либо является решением нелинейного уравнения:

$$\frac{d\Pi(Q)}{dQ} = \frac{d\tilde{\mathfrak{R}}^{\text{int}}(Q)}{dQ} - \left| \frac{d\tilde{\mathfrak{R}}^{\text{ext}}(Q)}{dQ} + \frac{d\tilde{\mathfrak{E}}(Q)}{dQ} \right| = 0,$$

либо определяет граничные точки области.

**Утверждение 5.** КЭ  $\tilde{\Pi}(Q)$  является разрывной функцией на границах подмножеств  $P_N \subset \Omega_Q$ , т.е.

$$\left\{ \begin{aligned} & \exists \xi \geq 0, \tilde{Q}: \{ Q_1 = \tilde{Q} - \xi \in P_N, Q_2 = \tilde{Q} + \xi \in P_{N-1} \} \& \\ & \& \left\{ \lim_{\xi \rightarrow 0} \tilde{\Pi}(Q - \xi) \neq \lim_{\xi \rightarrow 0} \tilde{\Pi}(Q + \xi) \right\} \end{aligned} \right\}.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе утверждений 2 – 5 можно сделать следующие выводы о свойствах функционала КЭ синтезируемого ТСВ в области: непрерывность по  $Q \in \Omega_Q$  и, конечно, разрывность по  $T \in \Omega_\Delta$ ; дифференцируемость по  $Q \in \Omega_Q$  и недифференцируемость по  $T \in \Omega_\Delta$ ; мультимодальность в области  $\{\Omega_Q \times \Omega_\Delta\}$ ; из свойств КЭ  $\Pi(Q, T)$  в области  $\{\Omega_Q \times \Omega_\Delta\}$  для определения его глобального экстремума предлагается следующий двухуровневый алгоритм. Пусть  $s(t)$  – номер итерации на верхнем (нижнем) уровне алгоритма  $s = 1, 2, \dots, t = 1, 2, \dots$ . Пусть при фиксированном на верх-

нем уровне  $T = T^{(s)} \in \Omega_{\Delta}$  глобальный минимум  $\Pi(Q, T^{(s)})$ , обозначаемый через  $\tilde{\Pi}(T^{(s)})$ , достигнут в точке  $\tilde{Q}(T^{(s)})$ . Вычислительная схема  $(s+1)$ -й итерации для предлагаемого декомпозиционного алгоритма имеет вид:

– **верхний уровень.** Определяется новое значение  $T = T^{(s+1)}$ ;

– **нижний уровень.** При  $T = T^{(s+1)}$  определяется суммарный минимум  $\tilde{\Pi}(Q) = \Pi(T^{(s+1)}, Q)$  в области  $\Omega_Q$ . Используем методы с учетом установленных свойств КЭ синтезируемой ТСВ. Далее приняв  $\tilde{Q}^{*(s+1)} = \tilde{Q}^*(T^{(s+1)})$ , реализуем переход к  $(s+2)$ -й итерации.

### Список литературы • References

1. Malozyomov B.V., Golik V.I., Brigida V., Kukartsev V.V., Tynchenko Y.A., Boyko A.A., Tynchenko S.V. Substantiation of Drilling Parameters for Undermined Drainage Boreholes for Increasing Methane Production from Unconventional Coal-Gas Collectors. *Energies*. 2023;(16):4276. <https://doi.org/10.3390/en16114276>.
2. Semin M.A., Levin L.Yu. Stability of air flows in mine ventilation networks. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019;124:167-171. DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.006.
3. Баловцев С.В., Скопинцева О.В., Куликова Е.Ю. Анализ аварийности и тенденции развития аэрологической безопасности угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 12. С. 135-149. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_12\_0\_135.  
Balovtsev S.V., Skopintseva O.V., Kulikova E.Yu. Analysis of accidents and development trends in aerological safety of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12):135-149. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_12\_0\_135.
4. Cheng L., Guo H., Lin H. Evolutionary model of coal mine safety system based on multi-agent modeling. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021;(147):1193-1200. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.046.
5. Esterhuizen G.S., Gearhart D.F., Klemetti T., Dougherty H., Dyke M. Analysis of gateroad stability at two longwall mines based on field monitoring results and numerical model analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019;29(1):35-43. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.021.
6. Wang K., Jiang Sh., Wu Zh., Shao H., Zhang W., Pei X., Cui Ch. Intelligent safety adjustment of branch airflow volume during ventilation-on-demand changes in coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017;(111):491-506. DOI: 10.1016/j.psep.2017.08.024.
7. Расчетно-прогнозная модель накопления взрывопожароопасных газов в рудничной атмосфере нефтяных шахт / В.В. Мяков, Г.И. Коршунов, Е.И. Кабанов и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 10. С. 136-151. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_10\_0\_136.  
Myakov V.V., Korshunov G.I., Kabanov E.I., Rodionov V.A. Prediction and analysis model of explosive and inflammable gas accumulation in air in oil mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(10):136-151. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236\_1493\_2024\_10\_0\_136.
8. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;(208):107433. DOI: 10.1016/j.res.2021.107433.
9. Zhang L., Zhou G., Ma Yu, Jing B., Sun B., Han F., He M., Chen Xu. Numerical analysis on spatial distribution for concentration and particle size of particulate pollutants in dust environment at fully mechanized coal mining face. *Powder Technology*. 2021;(383):143-158. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.01.039.
10. Федоткин И.О. Ключевые факторы угледобычи в ведущих странах мира // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2025. № 3. С. 153-167. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_3\_0\_153.  
Fedotkin I.O. Key factors of coal mining in world's leading countries. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025;(3):153-167. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236\_1493\_2025\_3\_0\_153.
11. Brigida V.S., Golik V.I., Dzeranov B.V. Modeling of coalmine methane flows to estimate the spacing of primary roof breaks. *Mining*. 2022;(2):809-821. DOI: 10.3390/mining2040045.
12. Разработка метода анализа и оценки оптимального состояния аэрогазодинамических процессов на угольных шахтах / И.И. Босиков, Р.В. Ключев, А.В. Майер и др. // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. № 1. С. 97-106. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.  
Bosikov I.I., Klyuev R.V., Mayer A.V., Stas G.V. Development of a method for analyzing and evaluating the optimal state of aerogasodynamic processes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(1):97-106. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.
13. Босиков И.И., Ключев Р.В., Хетагуров В.Н. Анализ и комплексная оценка газодинамических процессов на угольных шахтах с помощью методов теории вероятности и математической статистики // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. № 3. С. 461-467. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467.  
Bosikov I.I., Klyuev R.V., Khetagurov V.N. Analysis and comprehensive evaluation of gas-dynamic processes in coal mines using the methods of the theory of probability and math statistics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(3):461-467. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-461-467.
14. Kongar-Syuryun C., Klyuev R., Golik V., Oganessian A., Solovykh D., Khayrutdinov M., Adigamov D. Principles of sustainable development of georesources as a way to reduce urban vulnerability. *Urban Science*. 2024;8(2):44. DOI: 10.3390/urbansci8020044.

### Authors Information

**Bosikov I.I.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Oil and Gas Business of the North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, 362021, Russian Federation, e-mail: igor.boss.777@mail.ru

**Silaev I.V.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Physics and Astronomy, North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, Vladikavkaz 362025, Russian Federation

**Kuzina A.V.** – Associate Professor of the Department of Industrial, Civil and Underground Construction, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, e-mail: 1314598@mail.ru

**Mishedchenko A.A.** – Senior Lecturer, Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russian Federation, e-mail: a.a.mishedchenko@mospolytech.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 21.02.2025

Поступила после рецензирования: 16.04.2025

Принята к публикации: 26.04.2025

### Paper info

Received February 21, 2025

Reviewed April 16, 2025

Accepted April 26, 2025