

## ФЕНОМЕН «ЖИВУЧЕСТЬ» В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. А. Острейковский<sup>1</sup>, А. В. Сорочкин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Сургутский государственный университет, Сургут, Россия  
<sup>1</sup> academicostr@yandex.ru, <sup>2</sup> sorochkin\_av@surgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* XX в. привел человечество к решению многих новых проблем, которые характеризуются появлением структурно и функционально сложных систем (СФСС), что потребовало появления задач обеспечения их высокой надежности и безотказности. Из опыта применения СФСС по назначению в течение всего жизненного цикла к началу XXI в. был выявлен ряд важных недостатков: отличие фактического уровня надежности конструктивных элементов от нормативных требований; вычисляемая стоимость работ, выполняемых на СФСС во время их эксплуатации для обеспечения ресурса и надежности; недостаточная эффективность работ, выполняемых на СФСС для обеспечения ресурса и надежности; невозможность во многих случаях правильно диагностировать повреждения оборудования во время эксплуатации; отсутствие единой логически обоснованной системы нормативных документов; отсутствие единой научной методологии обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности СФСС; отсутствие централизованной системы управления работами по обеспечению качества СФСС, негативное влияние человеческого фактора. Вся семья изучаемых факторов потребовала применения основ системной концепции обеспечения высокого качества СФСС. Данная статья и посвящена решению ряда вышеперечисленных задач. *Материалы и методы.* Для решения многих проблем авторами статьи предлагается применение следующих подходов и теоретических методов: комплексного использования методов термодинамики, теории оператора функционального анализа и статистического моделирования, теории асимметрии внутреннего времени критически важных СФСС с длительными сроками активного существования. *Результаты и выводы.* Получены новые результаты применения современного функционального анализа и оценки асимметрии внутреннего времени.

**Ключевые слова:** исходный ресурс, остаточный ресурс, повреждаемость, зарождение дефектов, долговечность, живучесть, внутреннее время

**Для цитирования:** Острейковский В. А., Сорочкин А. В. Феномен «живучесть» в задачах обеспечения надежности сложных критически важных динамических систем // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 21–27. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-3

## THE PHENOMENON OF «SURVIVABILITY» IN PROBLEMS OF ENSURING RELIABILITY OF COMPLEX CRITICAL DYNAMIC SYSTEMS

V.A. Ostreykovskiy<sup>1</sup>, A.V. Sorochkin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Surgut State University, Surgut, Russia  
<sup>1</sup> academicostr@yandex.ru, <sup>2</sup> sorochkin\_av@surgu.ru

**Abstract.** *Background.* The XX century has led mankind to solve many new problems, which are characterized by the appearance of structurally and functionally complex systems (SFSS), which required the emergence of tasks to ensure their high reliability and reliability. From the experience of using SFSS for its intended purpose throughout the entire life cycle, by the beginning of the XXI century, a number of important shortcomings were identified: the difference between the actual level of reliability of structural elements and regulatory requirements; calculating the cost of work performed on the SFSS during their operation to ensure resource and reliability; insufficient efficiency of the work performed at the SFSS to ensure resource and reliability; the inability in many cases to correctly diagnose equipment damage during operation; the absence of a single logically sound system of regulatory documents; the lack of a unified scientific methodology for ensuring the strength, resource, reliability and safety of SFSS; the lack of a centralized management system for the quality assurance of SFSS, the negative impact of the human factor. The whole family of factors under study required the application of the fundamentals of the system concept of ensuring high quality of SFSS. This article is devoted to solving a number of the above tasks. *Materials and methods.* To solve many problems, the authors

of the article propose the use of the following approaches and theoretical methods: the integrated use of thermodynamics methods, the operator theory of functional analysis and statistical modeling, the theory of internal time asymmetry of critical SPSS with long periods of active existence. *Results and conclusions.* New results of the application of modern functional analysis and evaluation of the asymmetry of internal time are obtained.

**Keywords:** initial resource, residual resource, damage, origin of defects, durability, survivability, internal time

**For citation:** Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V. The phenomenon of «survivability» in problems of ensuring reliability of complex critical dynamic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(3): 21–27. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-3

## Введение

В многотомной монографии «Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов» Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) 1987–2009 г. были опубликованы результаты фундаментальных и прикладных исследований в области прочности, ресурса и безопасности водо-водяных энергетических установок (ВВЭР) атомных электростанций (АЭС)<sup>1</sup>.

Это позволило создать научно-техническую базу увеличения проектного срока службы основного оборудования реакторных установок без необходимости его замены в течение 60 лет, а также осуществить проекты АЭС с ВВЭР четвертого и пятого поколения с ресурсами 80–100 лет по критериям надежности и безопасности.

В дополнение к отмеченному выше необходимо подчеркнуть, что в конце XX в. также проводились исследования в области живучести информационно-вычислительных и управляющих систем [1].

Таким образом, исследования обеспечения живучести сложных технических компонентов являются чрезвычайно актуальными для нашего времени. Но при этом нельзя не отметить тот факт, что до настоящего времени в нашей стране только в период с 1983 по 2022 г. было выпущено в области надежности около 40 ГОСТов, и среди них нет ни одного, посвященного оценке такого важного свойства, как «живучесть» структурно и функционально сложных систем. И это выглядит очень странным фактом в науке о надежности и безопасности.

## Общие положения

В соответствии с мнением Академии наук РФ под «живучестью» понимается свойство системы, состоящее (в отличии от свойства «долговечности») в ее способности противостоять крупным возмущениям за пределами, установленными для их штатного функционирования, не допуская последующего каскадного развития аварийных и катастрофических ситуаций.

Обеспечение живучести достигается в рамках комплексных методологий по повышению безопасности путем создания барьеров безопасности, эшелонированной защиты, систем ликвидации последствий аварийных ситуаций, систем штатной и оперативной диагностики и мониторинга.

Живучесть, как и долговечность, закладывается на стадии проектирования систем, обеспечивается на стадии изготовления и поддерживается на стадии эксплуатации.

Также известно, что влияющим на качественные показатели живучести одним из главных факторов является трещиностойкость конструкционных материалов оборудования сложных систем [2–9]. В этих авторитетных источниках на начало XXI в. утверждается, что достигнутый к этому сроку уровень надежности и безотказности в атомной энергетике (АЭС) имел следующие недостатки:

- 1) отличие фактического уровня надежности элементной базы оборудования от нормативных требований;
- 2) высокая стоимость работ, выполняемых на АЭС во время их эксплуатации для обеспечения требуемой долговечности и надежности;
- 3) недостаточная эффективность работ, выполняемых на АЭС для обеспечения долговечности (ресурс) и надежности;
- 4) при выполнении работ невозможно во многих случаях диагностировать причины повреждения оборудования во время эксплуатации;
- 5) отсутствие единой логически обоснованной системы нормативной документации и единого логически обоснованного плана их разработки или усовершенствования;

<sup>1</sup> ГОСТ 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

6) отсутствие единой научной методологии обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности АЭС;

7) отсутствие централизованной отраслевой системы управления работами в области, указанной в п.6, негативное влияние человеческого фактора и отсутствие единой обоснованной программы повышения квалификации, неполная информационная обеспеченность работ.

В целях устранения отмеченных недостатков в начале XXI в. в РФ была разработана «Системная концепция обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС» [10]. Эта концепция имеет в своей основе принципы системного подхода и системной методологии [2].

### Характеристика показателей живучести структурно и функционально сложных систем

Живучесть как одна из важнейших характеристик сложных высоко ответственных и критически важных систем тесно связана с понятием техногенной безопасности. Техногенная безопасность оценивается по характеристикам надежности, прочности и ресурса технических систем. При этом обобщенным показателем – критерием техногенной безопасности – является понятие риска возникновения техногенных аварий и катастроф и математическое ожидание ущерба от них.

Фундаментальной основой определения показателей живучести является критерий трещиностойкости критических элементов оборудования структурно и функционально сложных систем (СФСС). Критерий трещиностойкости оборудования СФСС рассчитывается по критической температуре и коэффициентам интенсивности напряжений или деформации расчетным путем, а также по результатам испытаний стандартных лабораторных образцов с трещинами на растяжение и ударную вязкость моделей, узлов или натуральных элементов конструкций при однократном нагружении (с учетом конструктивных норм штатных изделий, материалов и технологии изготовления, типа циклов нагруженности в эксплуатации, температуры и времени) [2, с. 314–315].

Таким образом, свойство живучести тесно связано со свойством трещиностойкости конструкционных материалов оборудования СФСС. Как показано в работе [2, с. 308–319], в соответствии с системной концепцией обеспечения прочности, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС [2] основной «исходной зависимостью для упрощенного расчета развития трещины при штатных режимах от исходных дефектов является степенная зависимость скорости роста трещины  $\frac{dt}{dN}$  от размаха коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K_i$  при пульсирующем цикле нагружения для области циклического нагружения при числе нагрузок  $10^4 < N < 10^7$ :

$$\frac{dt}{dN} = C(\Delta K_i)^n, \quad (1)$$

где  $C$  и  $n$  – постоянные, зависящие от свойств материала и условий нагруженности, определяемые в экспериментах на образцах с трещинами.

Так, при отсутствии прямых экспериментальных данных значений  $C$  и  $n$  принимаются равными: для малоуглеродистых сталей 2,7 и  $1,6 \cdot 10^{-8}$ , для низколегированных сталей 2,9 и  $8,5 \cdot 10^{-9}$ , для аустенитных нержавеющей сталей 3,5 и  $5,4 \cdot 10^{-10}$  соответственно [2, с. 357].

Величины  $C$  и  $n$  при уточненных расчетах имеют вид

$$n = \frac{\left\{ 4 - [1 - m(I)] \left[ I - \frac{\Delta\sigma_{np}}{2\sigma_{0,2}} \right] \right\}}{[I - mI]} \quad (2)$$

и

$$C = \frac{I}{\left( \frac{I}{e_r} \ln \frac{I}{I - \Psi_{1,2}} \right)}, \quad (3)$$

где  $\Delta\sigma_{пр}$  – размах приведенных напряжений, равный  $(\sigma_{max})_{пр} - (\sigma_{min})_{пр}$ , находящихся на уровне  $2\sigma_{0,2}$ ;  $m(I)$  – показатель упрочнения в первом полцикле ( $K = 1$ );  $e_r$  – деформация предела текучести  $\left( e_r = \frac{\sigma_r}{E} \right)$ ;  $\Psi_{1,2}$  – относительное сужение в шейке разорванного образца [11].

Для случая заданной асимметрии цикла (при положительных значениях  $\sigma_r$ ) расчет может быть осуществлен по зависимостям вида [2, с. 357]

$$\frac{dt}{dN} = \frac{C_1 (\Delta K)^n}{(1 - r_\sigma K_C - \Delta K_i)} \quad (4)$$

Так как повреждаемости систем описываются статистическими распределениями и вероятность зарождения дефекта равна

$$P_3 = P(a_n \geq 1), \quad (5)$$

то полная вероятность разрушения системы из-за сквозных дефектов или крупномасштабного разрушения равна

$$P(\tau_1) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P^i(\tau_1)), \quad (6)$$

где  $N$  – число элементов в структурной модели системы.

Для определения вероятности разрушения конструкции системы рекомендуется пользоваться методами механики разрушения и должны быть определены следующие вероятности<sup>1</sup>:

- условные вероятности образования сквозного дефекта и крупномасштабного разрушения от одного дефекта в элементе при условии возникновения расчетного события  $PC_R$  в момент времени  $\tau_1$ ;
- вероятности образования сквозных дефектов и крупномасштабного разрушения от нескольких дефектов в элементе с учетом вероятностей возникновения расчетных событий;
- полные вероятности образования сквозных дефектов и крупномасштабного разрушения в конструкции.

Предполагается анализ образования сквозных дефектов. Рассмотрение трех причин их возникновения:

- 1) коррозионно-механическое зарождение новых дефектов;
- 2) коррозионно-усталостный рост поверхностных и подповерхностных дефектов;
- 3) критический рост поверхностных и подповерхностных дефектов.

### **Модели безотказности и долговечности в теории надежности сложных систем с учетом свойств живучести**

Для определения количественных значений показателей надежности в соответствии с выражением (6) необходимы значения функций распределения времени до отказа  $F_N^i(\tau)$  до перехода в предельное состояние  $F_{II}^i(\tau)$ .

Так, для определения показателей свойств безотказности и ремонтпригодности:

$$F_N^i(\tau) = P_T^i \left[ \ell^i(\tau) \leq \ell_{рем}^i \right] + P_{ист}^i \left[ a^i(\tau) > a_{рем}^i \right] \times \left\{ 1 - P_T^i \left[ \ell^i(\tau) \leq \ell_{рем}^i \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $P_T^i \left[ \ell^i(\tau) \leq \ell_{рем}^i \right]$  – вероятность, определяемая с использованием формул, описывающих образования устойчивых сквозных дефектов в  $i$ -м элементе, которые могут быть отремонтированы.

<sup>1</sup> ГОСТ 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

А для определения показателей долговечности используется функция распределения времени до перехода в предельное состояние  $F_{\Pi}(\tau)$ :

$$F_N^i(\tau) = P_{\text{кр}}^i(\tau) + P_T^i[\ell^i(\tau) > \ell_{\text{рем}}^i] \cdot [1 - P_{\text{кр}}^i(\tau)], \quad (8)$$

где  $P_T^i[\ell^i(\tau) > \ell_{\text{рем}}^i]$  – вероятность, определяемая с использованием формул в  $i$ -м элементе, которые не могут быть отремонтированы;  $P_{\text{кр}}^i(\tau)$  – вероятность крупномасштабного разрушения в  $i$ -м элементе, определяемая по формуле

$$P^i(\tau) = \sum_{i=1}^{N_{\text{PC}}} \frac{P^i}{PC(\tau_1) P_{PC_K}}, \quad (9)$$

где  $N_{\text{PC}}$  – число расчетных событий  $PC_K$ .

Теперь, зная аналитические выражения для функций распределения времени для определения вероятности безотказной работы и до перехода в предельное состояние, можно определить значения соответствующих интенсивностей отказов анализируемых систем  $\lambda_N^i(\tau)$  и  $\lambda_{\Pi}^i(\tau)$ :

$$\lambda_N^i(\tau) = \frac{dF_N^i}{d\tau} / [1 - F_N^i(\tau)] \quad (10)$$

и

$$\lambda_{\Pi}^i(\tau) = \frac{dF_{\Pi}^i}{d\tau} / [1 - F_{\Pi}^i(\tau)]. \quad (11)$$

При этом структура исследуемых систем обычно представляется в виде последовательного соединения элементов, для которых определяются интенсивности отказов (10) и переходов в предельное состояние (11). Тогда в соответствии с требованиями ГОСТа показатели безотказности, долговечности и готовности оборудования СФСС определяются по формулам для расчета показателей надежности оборудования СФСС.

### Заключение

Из содержания статьи целесообразно сделать следующие выводы:

1. Трещиностойкость конструкционных материалов оборудования СФСС является одним из главных факторов, влияющих на качественные показатели живучести.

Основные недостатки в атомной энергетике на начало XXI в.:

а) отличие фактического уровня надежности элементной базы оборудования от нормативных требований;

б) высокая стоимость работ, выполняемых на АЭС во время их эксплуатации для обеспечения требуемой долговечности и надежности;

в) недостаточная эффективность работ, выполняемых на АЭС для обеспечения долговечности (ресурс) и надежности;

г) при выполнении работ невозможно во многих случаях диагностировать причины повреждения оборудования во время эксплуатации;

д) отсутствие единой логически обоснованной системы нормативной документации и единого логически обоснованного плана их разработки или усовершенствования;

е) отсутствие единой научной методологии обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности АЭС;

ж) отсутствие централизованной отраслевой системы управления работами в области, указанной в п.б, негативное влияние человеческого фактора и отсутствие единой обоснованной программы повышения квалификации, неполная информационная обеспеченность работ [12].

2. Фундаментальной основой определения показателей живучести является критерий трещиностойкости критических элементов оборудования СФСС, который влияет на вероятность зарождения сквозных дефектов, основными причинами возникновения которых являются:

- а) коррозионно-механическое зарождение новых дефектов;
- б) коррозионно-усталостный рост поверхностных и подповерхностных дефектов;
- в) критический рост поверхностных и подповерхностных дефектов.

3. При расчете количественных значений показателей надежности СФСС система представляется в виде последовательного соединения элементов, для которых определяются:

- интенсивности отказов;
- интенсивности переходов в предельное состояние.

### Список литературы

1. Живучесть и реконфигурация информационно-вычислительных систем. Вып. 1. Теоретические основы живучести : сб. тез. докл. Второй Всесоюзной науч.-техн. конф. М., 1988. 218 с.
2. Махутов Н. А., Фролов В. К., Драгунов Ю. Г. [и др.]. Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов / под ред. Н. А. Махутова и М. М. Гадниной. М. : Наука, 2009. 499 с.
3. Гетман А. Ф. Ресурс эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС. М. : Энергоатомиздат, 2000.
4. Аркадов Г. В., Гетман А. Ф., Родионов А. Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы). М. : Энергоатомиздат, 2010. 424 с.
5. Антонов А. В., Острейковский В. А. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций: на примере энергоблоков Смоленской АЭС. М. : Инновац. машиностроение, 2017. 536 с.
6. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Асимметрия времени в теории прогнозирования состояния динамических систем : монография. Сургут : Печатный мир, 2018. 574 с.
7. Острейковский В. А. Анализ устойчивости и управляемости динамических систем методами теории катастроф. М. : Высш. шк., 2004. 312 с.
8. Острейковский В. А., Швыряев Ю. В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008.
9. Дьяков А. Ф., Канцдалов В. Г., Балтян В. Н. [и др.]. Техногенные катастрофы в тепловой и атомной энергетике: Прочностной анализ. Инженерная психология. Новые технологии их предотвращения. М. : Инновационное машиностроение, 2016. Т. 4. 616 с.
10. Руководящий документ СК-1-2005 «Системная концепция обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС». М. : КЦН БРАС, 2004.
11. Панкин А. М. Основные вопросы методологии диагностирования сложных технических объектов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 62–69. doi: 10.21685/2307-4205-2021-2-6
12. Северцев Н. А., Дарьина А. Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 5–14. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1

### References

1. *Zhivuchest' i rekonfiguratsiya informatsionno-vychislitel'nykh sistem. Vyp. 1. Teoreticheskie osnovy zhivuchesti: sb. tez. dokl. Vtoroy Vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konf. = Survivability and reconfiguration of information and computing systems. Issue 1. Theoretical foundations of survivability: a collection of abstracts of the Second All-Union scientific and technical conference.* Moscow, 1988:218. (In Russ.)
2. *Makhutov N.A., Frolov V.K., Dragunov Yu.G. et al. Issledovaniya napryazheniy i prochnosti yadernykh reaktorov. Analiz riska i povyshenie bezopasnosti vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov = Stress and strength studies of nuclear reactors. Risk analysis and improving the safety of water-water power reactors.* Moscow: Nauka, 2009:499. (In Russ.)
3. *Getman A.F. Resurs ekspluatatsii oborudovaniya i truboprovodov AES = Resource of NPP equipment and pipelines operation.* Moscow: Energoatomizdat, 2000. (In Russ.)
4. *Arkadov G.V., Getman A.F., Rodionov A.N. Nadezhnost' oborudovaniya i truboprovodov AES i optimizatsiya ikh zhiznennogo tsikla (veroyatnostnye metody) = Reliability of NPP equipment and pipelines and optimization of their life cycle (probabilistic methods).* Moscow: Energoatomizdat, 2010:424. (In Russ.)
5. *Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy: na primere energoblokov Smolenskoj AES = Resource and service life of nuclear power plant power units equipment: on the example of Smolensk NPP power units.* Moscow: Innovats. mashinostroenie, 2017:536. (In Russ.)

6. Ostreykovskiy V.A., Denisova T.Yu., Shevchenko E.N. *Asimetriya vremeni v teorii prognozirovaniya sostoyaniya dinamicheskikh sistem: monografiya = Time asymmetry in the theory of predicting the state of dynamic systems : monograph*. Surgut: Pechatnyy mir, 2018:574. (In Russ.)
7. Ostreykovskiy V.A. *Analiz ustoychivosti i upravlyaemosti dinamicheskikh sistem metodami teorii katastrof = Analysis of stability and controllability of dynamic systems by methods of the theory of catastrophes*. Moscow: Vyssh. shk., 2004:312. (In Russ.)
8. Ostreykovskiy V.A., Shvyryaev Yu.V. *Bezopasnost' atomnykh stantsiy. Veroyatnostnyy analiz = Safety of nuclear power plants. Probabilistic analysis*. Moscow: FIZMATLIT, 2008. (In Russ.)
9. D'yakov A.F., Kantsedalov V.G., Baltyan V.N. et al. *Tekhnogennye katastrofy v teplovoe i atomnoe energetike: Prochnostnyy analiz. Inzhenernaya psikhologiya. Noveye tekhnologii ikh predotvrashcheniya = Technogenic catastrophes in thermal and nuclear power: Strength analysis. Engineering psychology. New technologies for their prevention*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2016;4:616. (In Russ.)
10. *Rukovodnyy dokument SK-I-2005 «Sistemnaya kontseptsiya obespecheniya prochnosti, resursa, nadezhnosti i bezopasnosti oborudovaniya i truboprovodov AES» = Guidance document SK-I-2005 "System concept of ensuring the strength, resource, reliability and safety of NPP equipment and pipelines"*. Moscow: KTsN BRAS, 2004. (In Russ.)
11. Pankin A.M. Basic issues of methodology for diagnosing complex technical objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(2):62–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-2-6
12. Severtsev N.A., Dar'ina A.N. Application of similarity criteria in resource testing of complex technical systems and products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):5–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1

#### Информация об авторах / Information about the authors

**Владислав Алексеевич Острейковский**  
 доктор технических наук, профессор,  
 профессор кафедры информатики  
 и вычислительной техники,  
 Сургутский государственный университет  
 (Россия, г. Сургут, пр-т Ленина, 1)  
 E-mail: academicostr@yandex.ru

**Андрей Викторович Сорочкин**  
 аспирант,  
 Сургутский государственный университет  
 (Россия, г. Сургут, пр-т Ленина, 1)  
 E-mail: sorochkin\_av@surgu.ru

**Vladislav A. Ostreykovskiy**  
 Doctor of technical sciences, professor,  
 professor of the sub-department of information theory  
 and computer technology,  
 Surgut State University  
 (1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

**Andrey V. Sorochkin**  
 Postgraduate student,  
 Surgut State University  
 (1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
 The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию / Received 10.05.2023**

**Поступила после рецензирования / Revised 13.06.2023**

**Принята к публикации / Accepted 11.07.2023**