УДК 534.12 Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-423-432

Для цитирования: Иголкин А. А., Сафин А. И., Кузнецов А. В. Расчётно-экспериментальные исследования динамических характеристик макета рамы телескопа космического аппарата // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 4. С. 423–432. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-423-432.

For citation: Igolkin A. A., Safin A. I., Kuznetsov A. V. [Calculation and experimental study of the dynamic characteristics of the spacecraft telescope frame mockup]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 4, P. 423–432. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-4-423-432.

Расчётно-экспериментальные исследования динамических характеристик макета рамы телескопа космического аппарата

А. А. Иголкин, А. И. Сафин*, А. В. Кузнецов

Самарский университет Российская Федерация, 443086, г. Самара, ул. Московское шоссе, 34 *E-mail: safin@ssau.ru

В статье представлено расчётно-экспериментальное исследование динамических характеристик макета рамы телескопа космического аппарата. Основное внимание уделено методике проведения вибродинамических испытаний с использованием трёхкомпонентного лазерного виброметра и созданию конечно-элементной модели исследуемого макета. Для анализа динамики конструкции определены основные критерии, такие как модальные параметры, валидация модели и гармонический анализ. Особое внимание уделяется влиянию преобразования экспериментальных данных на точность расчёта критерия модальной достоверности. Исследован макет рамы телескопа, представляющий собой ферменную конструкцию, закреплённую на пружинах. Испытания проводились путём приложения случайного воздействия типа «белый шум». Получены динамические характеристики конструкции, включая собственную частоту колебаний, которая составила 93,7 Гц. Экспериментальные данные сравнивались с результатами конечно-элементного моделирования, показавшими значительное расхождение между ними, особенно в области собственных частот. Это свидетельствует о необходимости корректировки конечно-элементной модели. Рассмотрены различные критерии оценки соответствия расчётных и экспериментальных моделей, такие как координатный критерий модальной достоверности (СОМАС), критерий модальной достоверности (MAC), взаимный критерий гарантии (CSAC) и взаимный коэффициент пропорциональности (CSF). Эти критерии помогают оценить степень совпадения форм колебаний и частотных характеристик. Проведён анализ влияния преобразований экспериментальных данных в разные единицы измерения на результаты расчётов этих критериев. Сделан вывод о том, что текущая расчётная модель требует доработки и уточнения параметров для достижения лучшего соответствия с реальностью.

Ключевые слова: модальные параметры, конечно-элементная модель, валидация, гармонический анализ, критерии модельной достоверности, амплитудно частотные характеристики.

Calculation and experimental study of the dynamic characteristics of the spacecraft telescope frame mockup

A. A. Igolkin, A. I. Safin*, A. V. Kuznetsov

Samara University 34, Moskovskoe Shosse Str., Samara, 443086, Russian Federation *E-mail: safin@ssau.ru

The article presents a computational and experimental study of the dynamic characteristics of a spacecraft telescope frame mock-up. The main attention is paid to the methodology of vibrodynamic tests using a three-component laser vibrometer and the creation of a finite element model of the mock-up under study. To analyze the dynamics of the structure, the main criteria such as modal parameters, model validation and harmonic analysis are defined. Particular attention is paid to the effect of experimental data transformation on the accuracy of calculating the modal reliability criterion. The telescope frame mock-up, which is a truss structure fixed on springs, is investigated. The tests were carried out by applying a random impact of the "white noise" type. The dynamic characteristics of the structure were obtained, including the natural frequency of oscillations, which was 93.7 Hz. The experimental data were compared with the results of finite element modeling, which showed a significant discrepancy between them, especially in the area of natural frequencies. This indicates the need to adjust the finite element model. Various criteria for assessing the compliance of calculated and experimental models are considered, such as the coordinate criterion of modal validity (COMAC), the criterion of modal validity (MAC), the mutual guarantee criterion (CSAC) and the mutual proportionality factor (CSF). These criteria help to assess the degree of coincidence of vibration modes and frequency characteristics. An analysis of the effect of transforming experimental data into different units of measurement on the results of calculating these criteria is carried out. It is concluded that the current calculation model requires revision and clarification of parameters to achieve better compliance with reality.

Keywords: modal parameters, finite element model, validation, harmonic analysis, criterion of model reliability, amplitude-frequency characteristic.

Введение

В сложившейся тенденции отработки на вибрационную прочность конструкций космического аппарата (КА) с применением в качестве объекта исследования его первого лётного образца, а соответственно с применением расчётно-экспериментальных методик, задача коррекции конечно-элементной модели (КЭМ) по результатам экспериментальной отработки всё больше набирает актуальность [1-8]. В то же время, большое распространение получают бесконтактные методы получения динамических характеристик, несомненным плюсом которых является возможность проведения испытаний очень небольших и лёгких конструкций [9; 10]. Коррекция КЭМ по результатам испытаний может осуществляться прямым или итерационным методом. Также методы коррекции КЭМ можно классифицировать по использованию частотных и модальных характеристик объекта исследования [11; 12]. Как известно, использование частотных характеристик (FRF) имеет преимущества перед использованием модальных данных, так как последние обычно извлекаются из ограниченного количества точек вокруг резонирующих пиков на кривых FRF со свойственными числовыми ошибками, в то время как FRF содержит информацию от полного спектра частот. Каждый из методов характеризуются расчётом своих критериев. Однако использование различных критериев, таких как координатный критерий модальной достоверности (СОМАС) с критерием модальной достоверности (МАС) [уравнение (1)] – для модальных данных и критериев для частотных данных – взаимный критерий гарантии (CSAC) [уравнение (2)] и взаимный коэффициент пропорциональности (CSF) [уравнение (3)], сводится к получению числового значения или таблице значений, которые располагаются в диапазоне от 0 до 1. В статье представлен пример расчёта некоторых из указанных критериев с учётом особенностей обработки экспериментальных данных и влияние погрешностей сопоставления расчётной и экспериментальной сеток.

Анализ корреляции функции частотных характеристик между парами в каждой точке частоты оценивается с точки зрения взаимного критерия адекватности (CSAC) и взаимного коэффициента пропорциональности (CSF). CSAC является мерой корреляции формы между экспериментальными и аналитическими частотными характеристиками в пределах от 0 до 1 [уравнение (2)]. Между тем CSF является мерой различия в амплитуде между измеренными и рассчитанными откликами в пределах от 0 до 1 [уравнение (3)]. В целом, эти две корреляционных функции ФЧХ могут быть известны как функции взаимной корреляции подписи (CSC). Обычно они выражаются в единице процента (%) для лучшей интерпретации.

$$MAC = \frac{\left| \left\{ \Psi_X \right\}_i^H \times \left\{ \Psi_A \right\}_j \right|^2}{\left(\left\{ \Psi_A \right\}_j^H \times \left\{ \Psi_A \right\}_j \right) \times \left(\left\{ \Psi_X \right\}_i^H \times \left\{ \Psi_X \right\}_i \right)},\tag{1}$$

где $\{\Psi_X\}_i$ – экспериментальная форма частоты; $\{\Psi_A\}_i$ – расчётная форма частоты.

$$CSAC(\omega_{\kappa}) = \frac{\left|A_{M}^{H}(\omega_{\kappa}) \times A_{P}(\omega_{\kappa})\right|^{2}}{\left(A_{M}^{H}(\omega_{\kappa}) \times A_{M}(\omega_{\kappa})\right) \times \left(A_{P}^{H}(\omega_{\kappa}) \times A_{P}(\omega_{\kappa})\right)}, k = 1, 2, ..., N_{f},$$
(2)

$$CSF(\omega_{\kappa}) = \frac{\left|A_{M}^{H}(\omega_{\kappa}) \times A_{P}(\omega_{\kappa})\right|^{2}}{\left(A_{M}^{H}(\omega_{\kappa}) \times A_{M}(\omega_{\kappa})\right) + \left(A_{P}^{H}(\omega_{\kappa}) \times A_{P}(\omega_{\kappa})\right)}, k = 1, 2, ..., N_{f},$$
(3)

где A_p – расчётные значения FRF виброперемещений; A_M – экспериментальные значения FRF виброперемещений; N_f – собственная частота (номер тона).

Экспериментальные и расчётные исследования

Объект исследования – макет рамы телескопа космического аппарата дистанционного зондирования земли (КА ДЗЗ) представляет собой ферменную конструкцию (рис. 1). Для проведения испытаний конструкция была подвешена на пружинах с жёсткостями 770 и 730 Н/м. Возмущающее воздействие прикладывалось с помощью вибропульсатора со встроенным датчиком силы, что позволило получить данные по величине возмущающего воздействия. Нагружение конструкции осуществлялось в произвольном направлении в виде случайного воздействия типа «белый» шум.



Рис. 1. Макет рамы телескопа на подвесках и закраска конструкции для выделения места снятия данных

Fig. 1. Model of the telescope frame on suspensions and painting of the structure to highlight the data collection location

Исследование динамических характеристик конструкции макета рамы телескопа выполнялось с использованием трёхкомпонентного лазерного сканирующего виброметра Polytec PSV 400-3D. Предполагаемые места падения лазерного луча окрашивались в белый цвет. Так как конструкция макета имеет сложную пространственную форму (рис. 1), получение динамических характеристик возможно только на 1/4 конструкции за одно измерение без перемещения измерительных устройств лазерного виброметра. Проведение последующих экспериментальных исследований при перемещении измерительных устройств позволяет получить динамические характеристики, замеренные для точек остальной части конструкции. Первоначальный анализ показал, что точки «стыка» экспериментальных сеток конструкции могут находиться в разных фазах (рис. 2). Предполагается, что данная особенность может быть связана именно с видом функции возмущающего воздействия, так как при виде воздействия «белый шум» значение фазы носит случайный характер. Разрешение данной проблемы в рамках данной статьи не предполагается.



Рис. 2. Фазы совпадающих точек замера двух соседних замеров

Fig. 2. Phases of coinciding measurement points of two adjacent measurements

Использование лазерного виброметра в качестве средства измерения позволяет в качестве прямых результатов получить виброскорости в точках измерений. В специализированном программном обеспечении виброскорости могут быть преобразованы в виброускорения и виброперемещения [13]. Кроме того, наличие датчика силы позволяет также вычислять частотные характеристики в виде передаточных функций. Первичный анализ указанных характеристик позволяет сделать вывод о расположении собственных частот. Так, кривые среднеквадратичного значения амплитуд виброперемещений по всем направлениям для всех точек замеров показывают первую частоту собственных колебаний в 93,7 Гц (рис. 3). Передаточные функции позволяют вычислять модальные параметры, а именно собственные формы и частоты колебаний [14; 15]. Так как по результатам эксперимента возможно представление результатов в виде трёх различных размерностей: виброускорения, виброскорости и виброперемещения (в общем случае, для различного оборудования какая-либо из указанных характеристик является взятой непосредственно со средства измерения, а две других – вычисляются), то вычисление собственных форм также возможно при использовании в качестве исходных данных любой из характеристик. В этом случае встает вопрос погрешности, возникающей при проведении преобразований величин.

Конечно-элементная модель макета рамы телескопа КА ДЗЗ построена с использованием балочных элементов и дополнительных соединительных элементов с характеристиками жёст-кости и демпфирования.

Результаты расчётов и вибрационных испытаний показали, что первая и вторая собственные частоты расчётной модели близки к экспериментальным значениям частот колебаний первого и второго тонов макета рамы телескопа. На рис. 4 представлены значения критерия МАС при

получении форм колебаний из FRF по виброперемещениям. Анализ полученных данных показывает плохое соответствие расчётных и экспериментальных форм колебаний и необходимость коррекции конечно-элементной модели, а также несущественное различие в вычисляемых критериях от преобразования экспериментальных данных в различные единицы измерения.



Рис. 3. Среднеквадратичные значения амплитуд виброперемещений по всем направлениям для всех точек замеров

Fig. 3. Root-mean-square values of vibration displacement amplitudes all directions for all measurement points



Рис. 4. Значения критерия MAC при получении экспериментальных форм колебаний от FRF по виброперемещениям

Fig. 4. MAC criterion values when obtaining experimental vibration modes from FRF based on vibration displacements

Значения COMAC (табл. 1) указывают на то, что пространственная корреляция экспериментальных и расчётных пар узлов очень низкая, данное соотношение не указывает на несоответствие расчётной экспериментальной сетки в пространстве, а говорит о различном характере форм колебаний в экспериментальной и соответствующей ей расчётной точке. Данный факт также подтверждается тем, что узлы экспериментальной сетки можно переместить в соответствующий расчётный узел без изменения процедуры и результата вычисления СОМАС. Промежуточное преобразование экспериментальных данных в различные единицы измерения не сказывается на значениях СОМАС.

Особенностью расчёта CSAC является то, что необходимо сравнивать комплексные характеристики в соответствии с положительным и отрицательным направлением по степеням свободы (три поступательных и три вращательных), что в общем случае даёт 12 различных критериев. Имеющиеся экспериментальные и расчётные данные позволяют получить 3 критерия CSAC для положительного направления при поступательном движении относительно каждой из трёх осей глобальной системы координат.

Таблица 1

Номера узлов расчётных	Номера узлов экспериментальных	COMAC_X	COMAC_Y	COMAC_Z
290	40	0,1958	0,0720	0,2889
1971	44	0,1307	0,1043	0,0776
2014	46	0,1958	0,1039	0,2852
2262	34	0,0745	0,1285	0,0510
2636	48	0,0783	0,1071	0,0388
2810	41	0,0739	0,1701	0,0414
1112009	50	0,3968	0,1229	0,2258
1112068	35	0,1067	0,1174	0,0801
1112141	47	0,2412	0,0529	0,0783
1112211	26	0,1467	0,1729	0,1058
1112271	39	0,1165	0,0495	0,1674
1112280	23	0,1283	0,0812	0,1367

Значения критерия СОМАС

Полученные значения указанного критерия, а также среднеарифметическое значение представлены на рис. 5.





Fig. 5. Values of the CSAC criterion for FRF vibration displacements

Анализ полученных данных показывает, что результаты расчётной модели не соответствуют динамике конструкции по оси Y в большей степени, чем по другим осям. В области собственных частот расчётная модель даёт полное расхождение с экспериментом, а в диапазоне частот от 100 до 145 Гц наиболее соответствует поведению нагруженной конструкции по осям Z и X.

Аналогично критерию CSAC, CSF так же учитывает ось и направление, что сказывается на характере кривой CSF. Однако данный критерий характеризует соответствие по амплитуде колебаний, что в свою очередь приводит к зависимости от приложенных усилий. Так как предшествующий расчёт CSAC показал несоответствие расчётной и экспериментальной модели, то расчёт критерия CSF не может иметь достоверных характер. На рис. 6 показана близость по характеру критериев CSAC и CSF для одной и той же оси (для примера взята ось Z), а также зависимость критерия CSF от значения приложенных усилий.



Рис. 6. Результаты расчёта критерия CSAC для оси Z; CSF при нагрузке в виде зависимости силы от частоты F(ω), соответствующей экспериментальным данным; CSF при нагрузке в виде единичной силы в рассматриваемом диапазоне частот



Для количественного сравнения результатов соотношения расчётных и экспериментальных данных приведём к среднему значению в процентном отношении критерии MAC по формуле (4) и CSF по формуле (5):

$$MAC_{\%} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} MAC_{i}}{n}\right) \times 100 \%, \tag{4}$$

где *n* – собственные частоты,

$$CSF_{\%} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n} CSF_{i}}{n}\right) \times 100 \%,$$
(5)

где *п* – дискретные частоты всего диапазона измерений.

Полученные значения $MAC_{\rm ср.зн.} = 29,5$ %; $CSF_{\rm ср.зн.} = 34,8$ % указывают на то, что корреляция экспериментальных и расчётных форм по резонансным частотам в рассматриваемой системе ниже, чем корреляция экспериментальных и расчётных частотных характеристик во всём рассматриваемом диапазоне частот.

Заключение

Проведённое исследование показало важность использования современных методов вибродинамических испытаний и создания точных конечно-элементных моделей для анализа динамических характеристик конструкций космических аппаратов и их составных частей. Представленные методики позволяют получать детальную информацию о поведении макетов рам телескопов под воздействием внешних нагрузок, что критически важно для проектирования надёжных и долговечных космических аппаратов.

Были выявлены существенные расхождения между расчётными и экспериментальными данными, особенно в области собственных частот, что подчёркивает необходимость тщательной калибровки и корректировки конечно-элементной модели. Применение различных критериев оценки соответствия, таких как COMAC, MAC, CSAC и CSF, помогает выявить слабые стороны модели и определить пути её улучшения.

Дальнейшие работы должны быть направлены на выбор оптимальных варьируемых параметров и установление границ их значений для проведения эффективной процедуры коррекции модели. Только таким образом можно достичь высокой точности прогнозирования поведения реальных конструкций в условиях эксплуатации и обеспечить надежность и безопасность космических миссий.

Благодарности

Описанные в настоящей работе научно-исследовательские результаты получены в рамках выполнения и за счёт средств гранта РНФ 23-19-20025.

Acknowledgments

The research results described in this work were obtained within the framework of and at the expense of the RSF grant 23-19-20025.

Библиографические ссылки

1. Об оценке расходования механического ресурса конструкции российского сегмента Международной космической станции / А. В. Анисимов, Н. Ю. Введенский, А. И. Лиходед и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 1(62). С. 74–79.

2. Комаров, И. С. Наземная экспериментальная отработка изделий ракетно-космической техники на ударное воздействие от пиротехнических средств // Труды МАИ. 2013. № 71 [Электронный pecypc]. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/a18/a181f426004cc5762b6e7e87795eb545. pdf?lang=en&issue=71 (дата обращения: 05.09.2024).

3. Хатунцева О. Н., Шувалова А. М. О дополнительных «многомасштабных» критериях подобия для экспериментальной отработки изделий аэрокосмической техники // Вестник Москов. авиац. ин-та. 2023. Т. 30, № 1. С. 91–97. DOI: 10.34759/vst-2023-1-91-97.

4. Особенности наземной экспериментальной отработки крупногабаритных солнечных батарей / С. А. Захаров, В. И. Кузоро, Н. А. Тестоедов, В. И. Халиманович // Наукоёмкие технологии. 2016. Т. 17, № 7. С. 22–28.

5. Введенский Н. Ю., Пустобаев М. В. Анализ отработки космической техники на механические воздействия в США, ЕС и РФ // Вопросы электромеханики. 2012. № 130. С. 19–26.

6. Безмозгий, И. М., Софинский А. Н., Чернягин А. Г. Моделирование в задачах вибропрочности конструкций ракетно-космической техники // Космическая техника и технологии. 2014. № 3(6). С. 71–80.

7. Межин В. С., Обухов В. В. Сравнительный анализ методов экспериментального подтверждения конечно-элементных моделей конструкции космических аппаратов // Космическая техника и технологии. 2016. № 4(15). С. 14–23.

8. Balyakov D. F. Verification of finite-element model spacecraft via test results // Siberian Journal of Science and Technology. 2018. Vol. 19, No. 1. P. 8–16.

9. Lieven N. A. J., Waters T. P. The application of high-density measurements to dynamic finite element reconciliation // Proceedings of IMAC 13. 1995. P. 185–192.

10. Бесконтактная регистрация и анализ вибрации изделий машиностроения с помощью трёхкомпонентного лазерного виброметра / А. А. Иголкин, А. И. Сафин, Г. М. Макарьянц, Е. В. Шахматов // Прикладная физика. 2013. № 4. С. 49–53.

11. Allemang R., Brown D. A correlation coefficient for modal vector analysis // 1st International Modal Analysis Conference. Orlando, USA, 1984.

12. Dascotte E., Strobbe J. Updating Finite Element Models Using FRF Correlation Functions // Proceedings of the 17th IMAC Conference. Kissimmee, Florida, 1999. P. 1169–1174.

13. Heylen W., Lammens S., Sas P. Modal analysis theory and testing. M. : Novatest, 2010. 319 p.

14. A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator / P. Guillaume, P. Verboven, S. Vanlanduit at al. // Proceedings of IMAC 21, the International Modal Analysis Conference, Kissimmee (FL), USA, February 2003.

15. Parametric Identification of Transfer Functions in the Frequency Domain – a Survey / R. Pintelon, Guillaume P., Rolain Y. at al. // IEEE Trans. Autom. Control. 1994. Vol. AC-39, No. 11. P. 2245–2260.

References

1. Anisimov A. V., Vvedensky N. Yu., Likhoded A. I. et al. [On the assessment of the mechanical resource consumption of the structure of the Russian segment of the International Space Station]. *Kosmonavtika i raketostroyeniye*. 2011, No. 1 (62), P. 74–79 (In Russ.).

2. Komarov I. S. [Ground-based experimental testing of rocket and space technology products for impact effects from pyrotechnics]. *Trudy MAI*. 2013, No. 71 (In Russ.). Available at: https:// trudy-mai.ru/upload/iblock/a18/a181f426004cc5762b6e7e87795eb545.pdf?lang=en&issue=71 (assec-ced: 05.09.2024).

3. Khatuntseva O. N., Shuvalova A. M. [On additional multi-scale similarity criteria for experimental testing of aerospace products]. *Vestnik Moskov. aviats. in-ta.* 2023, Vol. 30, No. 1, P. 91–97. DOI: 10.34759/vst-2023-1-91-97 (In Russ.).

4. Zakharov S. A., Kuzoro V. I., Testoyedov N. A., Khalimanovich V. I. [Features of ground-based experimental testing of large-sized solar batteries]. *Naukoyëmkiye tekhnologii*. 2016, Vol. 17, No. 7, P. 22–28 (In Russ.).

5. Vvedensky N. Yu., Pustobaev M. V. [Analysis of testing space technology for mechanical impacts in the US, EU and RF]. *Voprosy elektromekhaniki*. 2012, Vol. 130, P. 19–26 (In Russ.).

6. Bezmozgiy I. M., Sofinsky A. N., Chernyagin A. G. [Modeling in problems of vibration strength of rocket and space technology structures]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2014, No. 3 (6), P. 71–80 (In Russ.).

7. Mezhin V. S., Obukhov V. V. [Comparative analysis of methods for experimental confirmation of finite element models of spacecraft designs]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2016, No. 4 (15), P. 14–23 (In Russ.).

8. Balyakov D. F. Verification of finite-element model spacecraft via test results. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018, Vol. 19, No. 1, P. 8–16 (In Russ.).

9. Lieven N. A. J., Waters T. P. The application of high-density measurements to dynamic finite element reconciliation. *Proceedings of IMAC 13*. 1995, P. 185–192.

10. Igolkin A. A., Safin A. I., Makaryants G. M. et al. [Noncontact registration and analysis of the product machine vibration with a three-component laser scanner]. *Prikladnaya fizika*. 2013, No. 4, P. 49–53 (In Russ.).

11. Allemang R., Brown D. A correlation coefficient for modal vector analysis. *1st International Modal Analysis Conference*. Orlando, USA, 1984.

12. Dascotte E., Strobbe J. Updating Finite Element Models Using FRF Correlation Functions. *Proceedings of the 17th IMAC Conference*. Kissimmee, Florida, 1999, P. 1169–1174.

13. Heylen W. et al. Modal analysis theory and testing. 2010, 319 p.

14. Guillaume P., Verboven P., Vanlanduit S. et al. A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator. *Proceedings of IMAC 21, the International Modal Analysis Conference*. Kissimmee (FL), USA, February 2003.

15. Pintelon R. et al. Parametric Identification of Transfer Functions in the Frequency Domain – a Survey. *IEEE Trans. Autom. Control.* 1994, Vol. AC-39, No. 11, P. 2245–2260.

© Иголкин А. А., Сафин А. И., Кузнецов А. В., 2024

Иголкин Александр Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский университет. E-mail: igolkin@ssau.ru. https://orcid.org/0000-0001-7411-0534

Сафин Артур Ильгизарович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических систем энергетических установок; Самарский университет. E-mail: safin@ssau.ru. https://orcid.org/0000-0003-0936-4364

Кузнецов Александр Владимирович – инженер НИИ-201; Самарский университет. E-mail: al.vl.kuznetsov@mail.ru. https://orcid.org/0000-0001-5485-427X

Igolkin Alexandr Alekseevich – Dr. Sc. (Engineering), Professor; Samara National Research University. E-mail: igolkin@ssau.ru. https://orcid.org/0000-0001-7411-0534

Safiv Artur Ilgizarovich – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor; Samara National Research University. E-mail: safin@ssau.ru. https://orcid.org/0000-0003-0936-4364

Kuznetsov Alexandr Vladimirovich – engineer; Samara National Research University. E-mail: al.vl.kuznetsov@mail.ru. https://orcid.org/0000-0001-5485-427X

Статья поступила в редакцию 11.11.2024; принята к публикации 26.11.2024; опубликована 26.12.2024 The article was submitted 11.11.2024; accepted for publication 26.11.2024; published 26.12.2024