

Пример использования динамического метода при расчете устойчивости конструкции мобильной башни обслуживания для ракеты-носителя «Союз-СТ»

© В.Г. Григорьев, А.А. Меньшиков

МАИ (НИУ), Москва, 125993, Россия

Для оценки устойчивости крупногабаритных пространственных балочно-стержневых конструкций, нагруженных несколькими силовыми факторами, предложено использовать частотно-модальный метод, основанный на решении задачи о собственных колебаниях предварительно нагруженной конструкции. Отмечено, что такой подход позволяет получать коэффициенты запаса по устойчивости от действия каждого компонента нагружения для конструкций с геометрической или физической нелинейностью. С помощью данного метода, реализованного в конечно-элементном программном комплексе Siemens Femap with NX Nastran, выполнено исследование конструкции мобильной башни обслуживания для ракеты-носителя «Союз-СТ» (космодром Куру, Французская Гвиана). Приведенные результаты исследования показывают, что при использовании динамического подхода коэффициенты запаса по несущей способности для системы в целом значительно увеличиваются по сравнению со стандартным подходом, основанным на эйлеровой теории смежных равновесных состояний. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: оценка запаса по устойчивости, крупногабаритные пространственные конструкции, мобильная башня обслуживания, динамическая устойчивость, метод конечных элементов, частотно-модальный метод, Femap, NX Nastran

Введение. Проектирование современных конструкций не обходится без применения компьютерных средств трехмерного моделирования и конечно-элементного расчета на прочность, что привело к появлению большого количества программных продуктов, созданных различными компаниями для этих целей. Многие из них предлагают специализированные программные комплексы для нужд каждой конкретной отрасли производства [1–4].

В авиационно-космической отрасли для проведения прочностных расчетов одной из наиболее широко используемых программ является NX Nastran с пре- и постпроцессорами фирм Siemens или MSC. Ее применяют в большей или меньшей степени практически во всех конструкторских бюро, занимающихся проектированием авиационной и ракетно-космической техники [5].

К сожалению, не все стандартные алгоритмы расчетов, используемые этим программным комплексом, являются универсальными для любых расчетных моделей. Анализ устойчивости стержневых

конструкций с помощью встроенных средств расчета, таких как SOL105 (Buckling), сводится к решению так называемой эйлеровой задачи, которая не дает возможности определить коэффициент запаса по устойчивости для отдельной компоненты сложного нагружения, а также для расчетных моделей, имеющих физическую и геометрическую нелинейности [6–9].

Авторами работы [10] был предложен более универсальный метод, позволяющий проводить оценку устойчивости конструкций, который лишен вышеперечисленных недостатков. Данный алгоритм может быть реализован в среде NX Nastran с применением некоторых его стандартных инструментов.

В настоящей работе представлена реализация частотно-модального метода, подробно описанного в [10], в Siemens Femap with NX Nastran на примере расчета конструкции мобильной башни обслуживания (МБО) для ракеты-носителя «Союз-СТ» (космодром Куру, Французская Гвиана). Показаны принципы построения расчетной модели и реализация алгоритма с помощью стандартных инструментов NX Nastran. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных стандартным решателем SOL105 и частотно-модальным методом.

Описание исследуемой конструкции. Пространственная металлоконструкция башни (рис. 1) состоит из ферм, балок, стоек, подкосов и связей. Элементы каркаса — прямоугольные замкнутые стальные профили, монтаж которых осуществлен в основном на пальцевых соединениях, аналогичных соединениям башенных кранов.

Часть соединений выполнена на фланцах с болтовым креплением. Защитная обшивка изготовлена из стального профилированного оцинкованного листа толщиной 0,75 мм с высотой профиля 56 мм.

Особенность построения силовой схемы металлоконструкции состоит в том, что на передней (северной) поверхности МБО предусмотрен проем, позволяющий откатывать МБО при стоящей на стартовой системе ракете космического назначения (РКН), а на задней (южной) поверхности — проем для подъезда тележки с космической головной частью (КГЧ) и транспортно-установочного агрегата. В связи с этим можно замкнуть силовой пояс с четырех сторон только на уровне крыши, а связать боковые (западную и восточную) стены МБО силовыми элементами можно лишь на уровнях от 13 до 27 м (см. рис. 1).

Важное преимущество трубчатых элементов конструкции — их относительно небольшой вес, что облегчает монтаж. Оптимизация пространственной металлической конструкции приводит к уменьшению нагрузок на рельсы и бетонную конструкцию космодрома. Кроме того, возможность разобрать всю конструкцию на длинномерные элементы позволяет компактно упаковать и хранить их на площадках минимальных размеров.

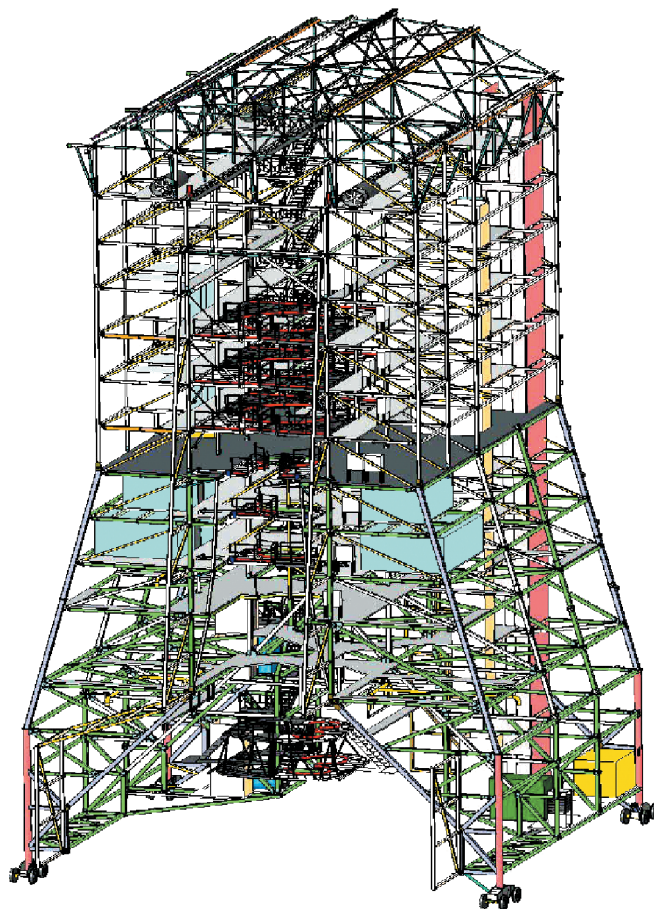


Рис. 1. Общий вид металлоконструкции мобильной башни обслуживания

Ходовая часть МБО представляет собой систему из четырех блоков тележек, расположенных под крайними опорами. Для того чтобы уменьшить воздействие горизонтальных нагрузок на рельсы при транспортировке МБО, колесные блоки устанавливают таким образом, чтобы парировать деформации от собственного веса МБО. В результате на рельсы будут воздействовать вертикальные нагрузки от веса и горизонтальные — от ветра.

На конструкцию МБО действуют нагрузки двух типов: собственный вес G и давление ураганного ветра W . Значения нагрузок и их сочетания рассчитывались согласно европейским нормативным документам [11, 12].

Расчетная модель. Конструкция смоделирована двухузловыми балочными элементами с шестью степенями свободы в каждом узле. Количество узлов — 32 562.

Панели обшивки рассматриваются как распределенная масса. Предварительные деформации и возможности передвижения колесных

блоков учитываются путем использования нелинейных элементов типа GAP для моделирования условий контакта в программе NX Nastran.

Соединения стержней смоделированы и как заделки, и как цилиндрические шарниры:

– соединения всех подкосов в вертикальной плоскости смоделированы как цилиндрические шарниры;

– соединения большинства горизонтальных связей между четьрьмя основными фермами смоделированы как цилиндрические шарниры;

– остальные соединения элементов смоделированы как заделки.

Все расчеты выполнены с использованием конечно-элементного программного комплекса Siemens Femap V11.0.

Стандартный метод определения коэффициентов запаса по устойчивости для элементов конструкции МБО. Применение нелинейных элементов типа GAP в расчетной модели приводит к тому, что стандартные расчетные модули, которые встроены в Nastran (такие как SOL105) и в своих алгоритмах используют линейный подход, основанный на эйлеровой теории, не могут быть использованы, так как будут давать заведомо ложные результаты.

С европейской стороны был согласован следующий алгоритм определения коэффициентов запаса по устойчивости. На первом этапе с помощью программы Nastran получено напряженно-деформированное состояние конструкции МБО для всех расчетных случаев, причем расчет выполнялся в нелинейной постановке с помощью решателя SOL106. На втором этапе полученные значения осевых сил использовались при решении задачи Эйлера для всех отдельных трубчатых элементов конструкции. Расчет проводился с применением программы Excel путем «ручной» подстановки значений осевых сил, длин и способов закрепления для каждого типа сечения. На рис. 2 показан элемент с минимальным запасом по устойчивости для конструкции.

На третьем этапе выполнялся расчет запаса по устойчивости для наиболее опасного стержня со следующими исходными данными: осевая действующая нагрузка $P_{oc} = 29\,113$ кГ; габаритные размеры поперечного сечения трубы — $120 \times 120 \times 5$ мм; длина $L = 6000$ мм; граничные условия на концах — шарнир — шарнир; материал — сталь 3.

По известной формуле Эйлера после подстановки данных была определена осевая критическая сжимающая сила $P_{кр}$:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu L)^2} \approx 29\,213 \text{ кГ.}$$

Коэффициент запаса по устойчивости

$$k = P_{кр} / P_{oc} \approx 1,003.$$

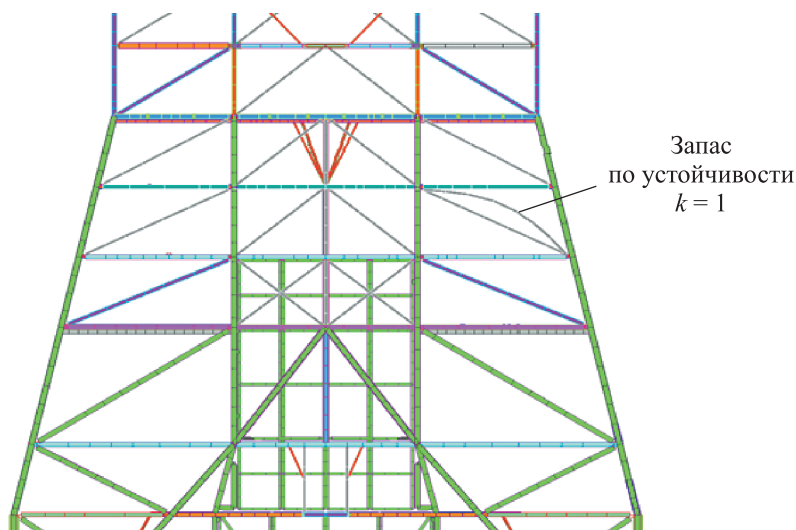


Рис. 2. Элемент с минимальным коэффициентом запаса по устойчивости $k = 1$

Недостатками такого метода оценки устойчивости является то, что он очень трудоемкий. Башня состоит из нескольких тысяч отдельных трубчатых элементов, имеющих различные сечения, различную длину и типы закрепления. Для выявления наиболее опасного элемента конструкции необходимо в полуручном режиме рассчитать устойчивость каждого элемента, что осложняется большим количеством расчетных случаев и частыми проектировочными изменениями. Кроме того, полученный коэффициент запаса связан лишь с осевой силой внутри рассматриваемого стержня, и поэтому он не может быть использован для определения коэффициента запаса по нагрузке, действующей на всю конструкцию [13, 14].

Частотно-модальный метод исследования устойчивости конструкции МБО. Подойдем к решению той же задачи, используя подход, основанный на динамической устойчивости. При таком подходе величина статической критической нагрузки соответствует ситуации, когда низшая собственная частота нагруженной конструкции приближается к нулевому значению, а затем с увеличением приложенной силы частота распадается на две мнимые комплексно-сопряженные величины. Варьирование масштабирующего множителя одной из компонент нагружения при фиксации остальных позволяет путем расчета собственных частот выявить точку обращения низшей собственной частоты в нуль. Тем самым реализуется возможность оценить запас устойчивости конструкции относительно любой составляющей нагружения как при наличии, так и в отсутствие остальных компонент.

Представим вектор нагружения МБО в следующем виде:

$$\bar{F} = \bar{G} + a \cdot \bar{W},$$

где \vec{G} — вектор силы тяжести; a — коэффициент запаса по устойчивости для компоненты ветрового нагружения; \vec{W} — вектор ветрового нагружения.

С помощью программы Nastran (SOL106) определим низшие собственные частоты предварительно нагруженной конструкции (рис. 3). Варьируя коэффициентом $0 \leq a \leq n$, где $n > 1$, исследуем устойчивость на заданном интервале.

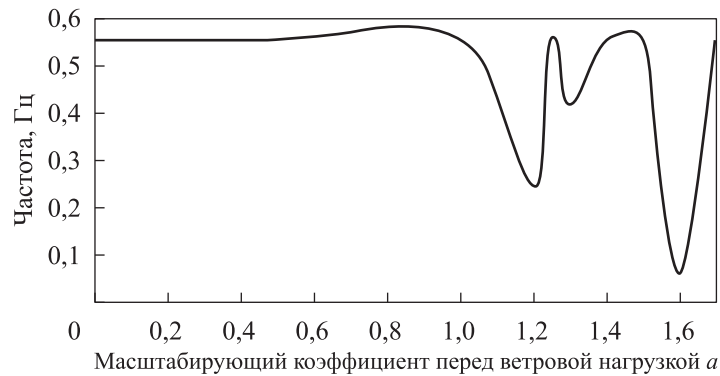


Рис. 3. Низшая собственная частота предварительно нагруженной конструкции МБО

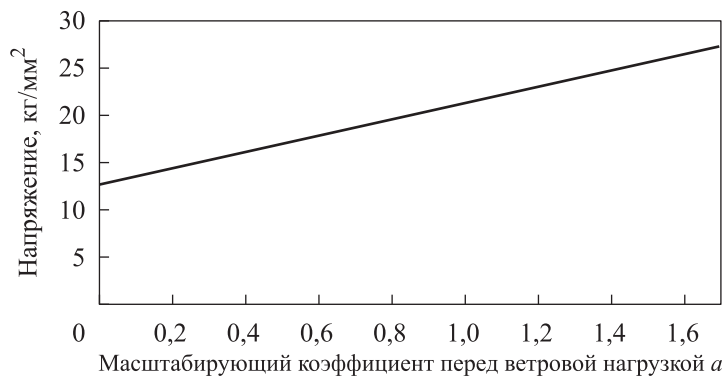


Рис. 4. Максимальные напряжения, действующие в конструкции МБО

На графике низшей собственной частоты (см. рис. 3) видно, что потери устойчивости в конструкции не происходит. В стержнях, близких к потере устойчивости, возникает перераспределение усилий на соседние элементы системы. При этом напряжения в конструкции возрастают практически линейно. Таким образом, задача определения коэффициента запаса по устойчивости сводится к определению коэффициентов запаса по допускаемым напряжениям. Для стали 3 предел текучести $[\sigma_T] = 25 \text{ кг/мм}^2$. Таким образом, по графику на рис. 4

видно, что при достижении предела текучести масштабирующий коэффициент перед ветровой нагрузкой $a = 1,4$.

Заключение. Существенным преимуществом частотно-модального метода является то, что для проведения расчета требуется мало времени. При этом надежность результатов будет выше, чем при использовании поэлементной эйлеровой оценки устойчивости.

При сравнении результатов, полученных разными методами исследования устойчивости, которые приведены в данной статье, можно сделать вывод, что использование частотно-модального метода дает более высокие значения коэффициентов запаса, чем в остальных случаях. Его применение поможет значительно экономить металл на стадии проектирования и создавать более оптимальные конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кузнецов Д.Н. Устойчивость состояния равновесия несущих конструкций в составе конечно-элементных систем. *Строительная механика и конструкции*, 2019, № 4 (23), с. 75–85.
- [2] Агапов В.П. Статические и динамические расчеты инженерных конструкций в вычислительном комплексе ПРИНС. *Машиностроение и инженерное образование*, 2006, № 1 (6), с. 39–50.
- [3] Титаренко Ф. Нелинейный мир и инструменты для расчета сложных нелинейных задач методом конечных элементов. *САПР и графика*, 2021, № 1 (291), с. 4–11.
- [4] Туснин А.Р. Особенности численного расчета конструкций из тонкостенных стержней открытого профиля. *Промышленное и гражданское строительство*, 2010, № 11, с. 60–62.
- [5] Рычков С.П. *Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran*. Москва, ДМК Пресс, 2013. 784 с.
- [6] Агапов В.П. Учет геометрической нелинейности и проектирование механизированных аттракционов. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*, 2005, № 1, с. 49–54.
- [7] Олуромби А.Р. Влияние состояния поставки стальных труб на несущую способность при сжатии с изгибом. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2019, № 5 (286), с. 57–63.
- [8] Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Бойко А.Г., Адлейба Т.С. Исследование общей устойчивости каркаса здания методом конечных элементов. *Строительство и архитектура*, 2019, т. 7, № 1, с. 45–48.
- [9] Свентиков А.А., Кузнецов Д.Н. Живучесть стального купола с решеткой из шестигранников. *Строительная механика и конструкции*, 2021, № 1 (28), с. 87–97.
- [10] Гнездилов В.А., Григорьев В.Г., Курников И.Е., Меньшиков А.А. Методика покомпонентного анализа запасов устойчивости крупногабаритных пространственных конструкций при действии многофакторных нагрузок. *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*, 2014, № 5, с. 51–60.
- [11] *Eurocode 1: Actions on structures. Pt. 1–4: General actions — Wind actions. BS EN 1991-1-4:2005*. Brussels, CEN. European Committee for Standardiza-

- tion. April 2005. 112. External Human-Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power.
- [12] *Eurocode No. 2. Design of Concrete Structures. Pt. 1: General Rules and Rules for Buildings (Revised Final Draft)*. October 1990. 115. Florence A.L. Clamped Circular Rigid-Plastic Plates under Central Blast.
- [13] Тукалов Ю.Я. The functional of additional energy for stability analysis of spatial rod systems. *Magazine of Civil Engineering*, 2017, no. 2 (70), pp. 18–32.
- [14] Краснощекоев Ю.В., Заполева М.Ю. Устойчивость поясов антенных опор. *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*, 2022, т. 19, № 6 (88), с. 936–948.

Статья поступила в редакцию 07.04.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Григорьев В.Г., Меньшиков А.А. Пример использования динамического метода при расчете устойчивости конструкции мобильной башни обслуживания для ракеты-носителя «Союз-СТ». *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 4. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-4-2265>

Григорьев Валерий Георгиевич — д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры 602 «Проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий» МАИ (НИУ). Автор более 40 опубликованных научных работ. Область научных исследований: численные методы механики.
e-mail: valgrigg@rambler.ru

Меньшиков Александр Алексеевич — старший преподаватель кафедры 602 «Проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий» МАИ (НИУ). Автор 1 опубликованной научной работы. Область научных исследований: численные методы механики, устойчивость балочно-стержневых систем.
e-mail: amenshikov@list.ru

An example of using the dynamic method in calculating the stability of the structure of a mobile service tower for Soyuz-ST launch vehicle

© V.G. Grigoriev, A.A. Menshikov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia

To assess stability of large-sized spatial beam-rod structures loaded with several force factors, the paper proposes to use the frequency-modal method based on solving the problem of natural oscillations in a preloaded structure. This approach makes it possible to obtain stability margin coefficients from action of each loading component for structures with geometric or physical nonlinearity. Using this method implemented in the Siemens Femap with NX Nastran finite element software package, the paper analyzes design of the mobile service tower of the Soyuz-ST launch vehicle (Kourou Space Center, French Guiana). Results show significant increase in the stability margin coefficient in bearing strength for the system as a whole, when using dynamic approach compared to the standard approach based on the Eulerian theory of adjacent equilibrium states. The results obtained demonstrate effectiveness of the proposed method.

Keywords: stability margin evaluation, large-sized spatial structures, mobile service tower, dynamic stability, finite element method, frequency-modal method, Femap, NX Nastran

REFERENCES

- [1] Kuznetsov D.N. Ustoychivost sostoyaniya ravnovesiya nesuschikh konstruktivnykh v sostave konechno-elementnykh sistem [Stability of the equilibrium state of bearing structures in composition of finite element systems]. *Stroitel'naya mekhanika i konstruktivnykh sistem* — *Construction Mechanics and Structures*, 2019, no. 4 (23), pp. 75–85.
- [2] Agapov V.P. Sticheskie i dinamicheskie raschety inzhenernykh konstruktivnykh v vychislitel'nom komplekse PRINSS [Static and dynamic calculations of engineering structures in the PRINCE computing complex]. *Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovaniye* — *Mechanical Engineering and Engineering Education*, 2006, no. 1 (6), pp. 39–50.
- [3] Titarenko F. Nelineynyi mir i instrumenty dlya rascheta slozhnykh nelineynykh zadach metodom konechnykh elementov [Nonlinear world and tools for calculating complex nonlinear problems by the finite element method]. *SAPR i grafika* — *CAD and Graphics*, 2021, no. 1 (291), pp. 4–11.
- [4] Tusnin A.R. Osobennosti chislennogo rascheta konstruktivnykh iz tonkostennykh stержney otkrytogo profilya [Features of numerical calculation of structures made of thin-walled rods of an open profile]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* — *Industrial and Civil Engineering*, 2010, no. 11, pp. 60–62.
- [5] Rychkov S.P. *Modelirovaniye konstruktivnykh v srede Femap with NX Nastran* [Modeling of structures in the Femap environment with NX Nastran]. Moscow, DMK Press Publ., 2013, 784 p.
- [6] Agapov V.P. Uchet geometricheskoy nelineynosti i proektirovaniye mekhanicheskikh attraksionov [The account of geometric nonlinearity in the design and analysis of the mechanized attractions]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktivnykh i sooruzheniy* — *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2005, no. 1, pp. 49–54.

- [7] Olurombi A.R. Vliyanie sostoyaniya postavki stalnykh trub na nesuschuyu sposobnost pri szhatii s izgibom [Influence of the state of supply of steel pipes on the bearing capacity during compression with bending]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy — Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 2019, no. 5 (286), pp. 57–63.
- [8] Kravchenko G.M., Trufanova E.V., Boyko A.G., Adleiba T.S. Issledovanie obshchey ustoychivosti karkasa zdaniya metodom konechnykh elementov [Research of the stability analysis for frame buildings using finite element method]. *Stroitelstvo i arkhitektura — Construction and Architecture*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 45–48.
- [9] Sventikov A.A., Kuznetsov D.N. Zhivuchest stalnogo kupola s reshetkoy iz shestigrannikov [Durability of steel spherical dome with lattice from hexagons]. *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii — Construction Mechanics and Structures*, 2021, no. 1 (28), pp. 87–97.
- [10] Gnezdilov V.A., Grigoriev V.G., Kournikov I.E., Menshikov A.A. Metodika pokomponentnogo analiza zapasov ustoychivosti krupnogabaritnykh prostanstvennykh konstruksiy pri deystvii mnogofaktornykh nagruzok [A method of componentwise analysis of stability margins for large-sized spatial structures under multifactor loads]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy — Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 2014, no. 5, pp. 51–60.
- [11] *Eurocode 1: Actions on structures. Pt. 1–4: General actions – Wind actions*. BS EN 1991-1-4:2005. Brussels, CEN / European Committee for Standardization. April 2005. 112. External Human-Induced Events in Site Evaluation for Nuclear Power.
- [12] *Eurocode No. 2. Design of Concrete Structures. Pt. 1: General Rules and Rules for Buildings (Revised Final Draft)*. October 1990. 115. Florence A. L. Clamped Circular Rigid-Plastic Plates under Central Blast.
- [13] Tyukalov Yu.Ya. The functional of additional energy for stability analysis of spatial rod systems. *Magazine of Civil Engineering*, 2017, no. 2 (70), pp. 18–32.
- [14] Krasnoschekov Yu.V., Zapoleva M.Yu. Ustoychivost poyasov antennykh opor [Stability of antenna support belts]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta — The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2022, vol. 19, no. 6 (88), pp. 936–948.

Grigoriev V.G., Dr. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Professor, Department 602 “Design and Strength of Aeronautical Missile and Space Products”, MAI (NRU). Author of more than 40 published scientific works. Area of scientific research: numerical methods in mechanics. e-mail: valgrigg@rambler.ru

Menshikov A.A., Senior Lecturer, Department 602 “Design and Strength of Aeronautical Missile and Space Products”, MAI (NRU). Author of 1 published scientific work. Area of scientific research: numerical methods in mechanics, stability of beam-rod systems. e-mail: amenshikov@list.ru