

УДК 51-74:004.942

## ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ НАГРУЖЕННОСТИ ПРЕЦИЗИОННОЙ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Рейзмунт Елена Михайловна**

к.т.н., н.с., e-mail: [e.sigova@gmail.com](mailto:e.sigova@gmail.com),

**Доронин Сергей Владимирович**

к.т.н., доцент, в.н.с., e-mail: [sdoronin@ict.nsc.ru](mailto:sdoronin@ict.nsc.ru),

Красноярский филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий»,  
660049 г. Красноярск, пр. Мира 53.

**Аннотация.** Рассматриваются условия нагружения зеркальных антенн воздушным потоком и тепловыми воздействиями с учетом вариабельности пространственного положения конструкции. Предложена концепция построения цифровых моделей нагруженности крупногабаритной прецизионной антенны наземных систем спутниковой связи. Определены возможности их интеграции в контуры принятия решений для интеллектуальной поддержки стадии эксплуатации.

**Ключевые слова:** цифровая модель нагруженности, антенна, поддержка жизненного цикла.

**Цитирование:** Рейзмунт Е. М., Доронин С. В. Цифровые модели нагруженности прецизионной зеркальной антенны для интеллектуальной поддержки стадии эксплуатации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 2 (22). С. 53-60. DOI:10.38028/ESI.2021.22.2.005

**Введение.** Крупногабаритные прецизионные антенны – уникальные технические объекты, опыт создания и эксплуатации которых сравнительно мал. Поэтому многие аспекты обеспечения их работоспособности в течение эксплуатации, как одной из стадий жизненного цикла (ЖЦ), являются не только недостаточно проработанными, но и даже неосознанными. В настоящей работе предполагается попытка рассмотреть эти аспекты с точки зрения подходов, основанных на идеологии построения и использования цифровых моделей.

На сегодняшний день достаточно широкое распространение получили цифровые модели рельефа [1-2] и местности [3], свойств почв [4], месторождений [5], поверхностей [6], зданий и строительных сооружений [7-8], производств [9].

Перечисленные цифровые модели используются для информационного обеспечения построения карт и планов, ГИС разработок (электронных карт и навигаторов), определения любых геометрических параметров местности и объектов (расстояний, размеров, высот и т.п.), детального анализа экспозиции и уклонов склонов, осуществления расчета площадей и объемов земляных работ, анализа зон видимости, реконструкции палеорельефа, построения гидросетей, транспортных сетей и развязок, разработки рациональных вариантов строительства зданий и сооружений, расчета остаточного ресурса объектов строительства и производства, оптимизации режима работы оборудования, предотвращения поломок и аварий на производстве, проведения реконструкции производства, повышения надежности и эффективности эксплуатации и т.д.

Что касается прецизионных зеркальных антенн, разработка, изготовление и эксплуатация которых требует привлечения целого комплекса междисциплинарных знаний, отметим полное отсутствие публикаций о попытках построения цифровых моделей и использования их для принятия решений на различных стадиях ЖЦ.

В основе рассматриваемой в настоящей работе идеи построения цифровых моделей нагруженности прецизионных зеркальных антенн лежит опыт, накопленный при многовариантных расчетах их силовых конструкций на стадии НИОКР. Результаты

фрагментарных (выполненных в ограниченном объеме) расчетов зеркала на действие воздушного потока [10] и его фрагментов на тепловые воздействия [11-13] имеют ограниченное применение в пределах стадии поискового проектирования, но могут быть расширены для их использования на стадии эксплуатации.

### 1. Характеристика технического объекта для построения цифровой модели.

Силовая конструкция крупногабаритной (диаметр 12 м) прецизионной антенны наземных систем спутниковой связи (рис. 1) состоит из зеркала, стержневого каркаса и ступицы. Зеркало, в свою очередь, состоит из отдельных сегментов, поперечное сечение которых образовано двумя наружными слоями тканого полимерного композитного материала (ПКМ) и одним внутренним слоем пенопласта. Каждый сегмент независимо от других монтируется на пространственном стержневом каркасе, элементы которого (трубы) выполнены из однонаправленного ПКМ.



Рис. 1. Общий вид геометрической модели антенны

Условия использования антенны характеризуются возможностью ее поворота на опоре в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Угол наклона фокальной оси антенны относительно горизонта составляет от 0 до 90° (угол места), поворота в горизонтальной плоскости – от 0 до 360° (азимут). Это приводит фактически к непрерывному множеству пространственных положений антенны.

Основными воздействиями, обуславливающими нагруженность (напряженно-деформированное состояние), геометрическую стабильность, прочность и долговечность прецизионных зеркальных антенн, являются солнечное излучение, воздушный поток (ветер) и температура окружающей среды. На стадии разработки величины этих воздействий для данного типа конструкции ограничены нормативами и могут принимать следующие значения: интегральная плотность потока солнечного излучения до 1120 Вт/м<sup>2</sup>, диапазон температур окружающей среды – от минус 50 до плюс 55 °С, максимальное значение скорости воздушного потока 50 м/с.

В соответствии с действующими нормами проектный расчет выполняется на независимое действие максимальных значений этих воздействий. Это позволяет решить задачи проектирования, но не дает возможность ответить на вопросы, возникающие на стадии эксплуатации для обеспечения длительного безотказного функционирования. В частности, неизвестной оказывается прогнозируемая история нагружения, формирующаяся при постоянном изменении внешних воздействий с учетом переменного пространственного положения антенны. А именно характер истории нагружения определяет интенсивность расходования ресурса элементов конструкции и техническое состояние объекта в целом в любой момент времени.

### 2. Концепция построения цифровой модели нагруженности зеркальной антенны.

Естественным и единственно возможным практическим способом преодоления затруднений, вызванных отмеченными непрерывностью множества пространственных положений антенны и достаточно большими диапазонами значений внешних воздействий, является

дискретизация всех входящих переменных задачи с некоторым шагом. Но и в этом случае количество рассматриваемых вариантов, порождаемых простым перебором и поиском всех возможных комбинаций дискретизированных входящих переменных, оказывается весьма велико.

Еще одно затруднение связано со следующим обстоятельством. Адекватная оценка силового воздействия воздушного потока на зеркало антенны с учетом вариации ее пространственного положения и направления ветра возможна путем численного решения задачи внешней аэродинамики. Это требует трехмерного моделирования всех элементов конструкции, что с учетом пространственной сложности и конфигурации каркаса приводит практически к непреодолимым вычислительным трудностям даже при решении задачи с одним набором входных данных.

С учетом рассматриваемых затруднений вычислительного характера при разработке концепции построения цифровой модели основываемся на следующих соображениях:

- давление воздушного потока на зеркало антенны определяется его пространственным положением, направлением и скоростью ветра;
- тепловое состояние антенны определяется значением интегральной плотности потока солнечного излучения и усредненным коэффициентом конвективной теплоотдачи;
- воздействия воздушного потока и солнечного излучения независимы друг от друга;
- расчет силовой конструкции осуществляется в линейной стадии деформирования, что позволяет, исходя из принципа линейной суперпозиции сил, осуществлять простое суммирование силовых факторов, получаемых при решении сопряженных задач внешней аэродинамики, термодинамики и линейной механики деформируемого твердого тела.

Основные положения концепции сформулированы следующим образом.

1. Цифровая модель нагруженности строится путем накопления и обобщения результатов многовариантных вычислительных экспериментов по анализу напряженно-деформированного состояния зеркальной антенны с использованием системы ее конечно-элементных моделей. С учетом особенностей постановок задач внешней аэродинамики, термодинамики и линейной механики деформируемого твердого тела используются конечно-элементные модели, основанные на трехмерных (объемные тела) или двумерных (оболочки) представлениях конструкции зеркала и ступицы, одномерных (балки) представлениях конструкции каркаса. Во всех моделях характер конечно-элементной дискретизации определяется из условий сеточной сходимости.
2. Дискретизация непрерывного множества пространственных положений антенны осуществляется варьированием угла места в диапазоне от 0 до 90° с шагом 15°, и азимута в диапазоне от 0 до 360° с шагом 15°. Таким образом, получается 168 вариантов пространственного положения антенны.
3. Дискретизация непрерывного множества скоростей воздушного потока осуществляется в диапазоне от 0 до 50 м/с с шагом 10 м/с. Поскольку нет необходимости рассматривать нулевую скорость, то получается 5 вариантов значений скоростей воздушного потока.
4. Дискретизация непрерывного множества условий теплового нагружения осуществляется варьированием температуры окружающей среды в диапазоне от минус 50 до 55 °С с шагом 15 °С, и интегральной плотности потока солнечного излучения в диапазоне от 0 до 1120 Вт/м<sup>2</sup> с шагом 224 Вт/м<sup>2</sup>. В итоге получается 48 вариантов сочетания температуры окружающей среды и интегральной плотности потока солнечного излучения.
5. Для дискретизированных значений воздействий воздушного потока и пространственного положения антенны для трехмерной модели зеркала осуществляется

многовариантный численный анализ задачи внешней аэродинамики, результаты которого (поля давлений на поверхности зеркала) сохраняются в виде усилий в узлах сетки конечных элементов ( $168 \cdot 5 = 840$  вариантов).

6. Для дискретизированных значений температуры окружающей среды и интегральной плотности солнечного излучения осуществляется многовариантный численный анализ сопряженной задачи радиационно-конвективного теплообмена и термоупругости, результаты которого также сохраняются в виде усилий в узлах сетки конечных элементов ( $168 \cdot 48 = 8064$  вариантов).

Результаты, описанные в пп. 5 и 6 можно считать цифровыми моделями нагруженности силовой конструкции антенны воздушным потоком и тепловыми воздействиями, полученные путем дискретизации как внешних воздействий, так и самой конструкции. При этом не накладываются требования идентичности сеток при решении задач по пп. 5 и 6.

**3. Применение цифровых моделей нагруженности зеркальной антенны для интеллектуальной поддержки стадии эксплуатации.** Стадия эксплуатации сложных крупногабаритных технических объектов характеризуется большой продолжительностью (обычно десятилетиями) и вариабельностью внешних условий, определяющих динамику состояния объекта. Для управления этим состоянием необходима дискретизация характеризующих его переменных по времени. При этом выбор переменных и величина шага дискретизации по времени зависит от целей управления.

Крупногабаритные зеркальные антенны целесообразно рассматривать как объекты, работающие в условиях квазистатического нагружения (с учетом высокой жесткости конструкции прецизионной антенны динамическими явлениями вследствие порывов ветра и вихреобразования можно пренебречь). Тогда с позиций дискретизации стадия эксплуатации может быть представлена последовательностью ситуаций, характеризующихся постоянными на текущем шаге дискретизации по времени значениями величин, являющихся входящими переменными задач, решаемых при построении цифровых моделей нагруженности.

Уточним значение понятия «ситуация». В толковом словаре Ожегова [14] под ситуацией понимается «совокупность обстоятельств, положение, обстановка», в словаре Ушакова [15] «совокупность обстоятельств, условий, создающих те или иные отношения, обстановку или положение». С учетом этого в настоящей работе будем рассматривать дискретизацию стадии эксплуатации с помощью ситуаций, характеризующихся множеством значений величин, являющихся входными данными (переменными) задач, решаемых при построении цифровых моделей нагруженности.

Логика построения и использования цифровых моделей нагруженности на стадии эксплуатации отражается двухконтурной схемой обработки информации (рис. 2), в которой собственно цифровые модели нагруженности принадлежат обоим контурам и объединяют их.

Ядром информационного контура использования цифровых моделей нагруженности на стадии эксплуатации является численная (конечно-элементная) модель силовой конструкции антенны. В общем случае сетка конечных элементов не идентична сетке, использованной при построении цифровых моделей нагруженности. Поэтому первой процедурой рассматриваемого информационного контура является интерполяция – приведение содержащихся в цифровых моделях нагруженности узловых усилий в соответствие с особенностями сеточных областей численной модели силовой конструкции антенны.

Следующая процедура заключается в суммировании интерполированных значений нагруженности воздушным потоком и тепловыми воздействиями на основании принципа линейной суперпозиции. На этом этапе формируется полная картина нагруженности, являющаяся входом для численной модели силовой конструкции антенны.

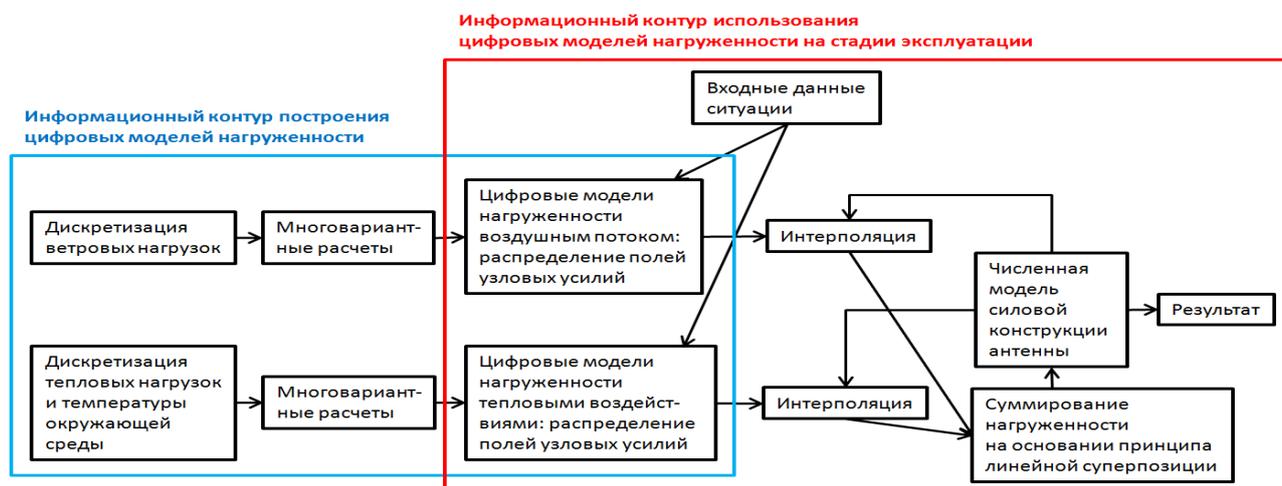


Рис. 2. Информационные контуры построения и использования на стадии эксплуатации цифровых моделей нагруженности

Наконец, реализация модели для сформированных описанным способом условий нагружения позволяет быстро (фактически в режиме реального времени с учетом скорости протекания рассматриваемых физико-технических процессов) получить детальную информацию о напряженно-деформированном состоянии всех структурных элементов силовой конструкции антенны.

Использование построенной таким образом цифровой модели нагруженности на стадии эксплуатации возможно с двух взаимосвязанных точек зрения – условно «взгляд в прошлое» (ретроспективной) и «взгляд в будущее» (перспективной). Взгляд в прошлое включает в себя фиксацию (мониторинг) с дискретным шагом по времени фактических значений температуры окружающей среды, уровня солнечного излучения, скоростей ветра, пространственного положения антенны. На основании этого в течение всей стадии эксплуатации формируется цифровая модель истории нагружения всех силовых элементов конструкции антенны, позволяющей оценивать уровень накапливаемых повреждений, определять стратегию дальнейшей эксплуатации. Взгляд в будущее основан на краткосрочном прогнозе значений внешних воздействий и уровня нагруженности для принятия тактических решений, предотвращающих нарушения работоспособности.

**Заключение.** Детальный, с требуемым уровнем точности, численный анализ деформирования крупногабаритной зеркальной антенны, подверженной воздействиям воздушного потока и солнечного излучения, требует значительных временных и вычислительных ресурсов. Это не позволяет использовать постановку задач и результаты такого анализа для оперативного прогнозирования и управления техническим состоянием объекта на стадии эксплуатации.

Разработка цифровых моделей нагруженности конструкции на ранних стадиях жизненного цикла для их использования в целях интеллектуальной поддержки стадии эксплуатации позволяет реализовать идею решения сложных технических задач для оперативного принятия управленческих решений в условиях дефицита времени (время решения задачи существенно превышает время, в течение которого должно быть принято решение). Возможность и эффективность таких решений обусловлена переносом части решения сложных ресурсоемких задач на более ранние стадии ЖЦ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селезнева Е.В., Лурье И.К., Панин А.В. Создание и исследование цифровых моделей рельефа для реконструкции палеорельефа острова Пор-Бажын / Геоинформатика. № 3. 2009. С. 37-44.

2. Нафиева Е.Н., Гречищев А.В. Построение цифровой модели рельефа методом радиолокационной интерферометрии / Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2020. Т. 2. № 5. С. 96-103.
3. Олейник А.М., Важенин Д.П. Применение цифровой модели местности при геодезическом обеспечении строительства транспортных развязок // Вестник научных конференций. 2019. № 5-3 (45). С. 68-70.
4. Фарбер С.К., Кузьмик Н.С. Формирование цифровой модели влажности почв на основе показателей рельефа местности и по материалам лесоустройства // «Известия вузов. Лесной журнал». 2020. № 4. С. 53-67. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-53-67.
5. Нурсултанова С. Н., Сматуллина А. Б. Построение цифровой геологической модели месторождения с. Нуржанов // Геология и охрана недр. 2018. № 4 (69). С. 53-57.
6. Глазунова Е.М., Савоськин Е.М. Математическая модель процесса создания цифровой модели стопы в результате ее бесконтактного сканирования // «Современные информационные технологии в образовании, науке и промышленности». Сборник трудов VI международной конференции: IV международный конкурс научных и научно-методических работ. Международная академия информатизации. Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского. 2016. С. 29-32.
7. Гурьева Ю.А. BIM-технологии в строительном комплексе: зарубежный и отечественный опыт // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы III Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: СПбГАСУ. 2020. С. 62-68. DOI: 10.23968/BIMAC.2020.006.
8. Черных А.Г., Корольков Д.И., Пакина А.С. Алгоритм расчета остаточного ресурса строительных конструкций при создании информационной модели здания или сооружения // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы III Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: СПбГАСУ. 2020. С. 174-180. DOI: 10.23968/BIMAC.2020.021.
9. Коновалова Г.И. Модель оперативного управления машиностроительным предприятием в условиях цифрового производства // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 5 (78). С. 79-85. DOI: 10.30987/article\_5cda64cfa6d2c9.23311329.
10. Прикладные задачи конструкционной прочности и механики разрушения технических систем. / В.В. Москвичев, Н.А. Махутов, Ю.И. Шокин, А.М. Лепихин и др. Новосибирск: Наука. 2021. 796 с.
11. Доронин С.В., Рейзмунт Е.М., Филиппова Ю.Ф. Построение информационно-вычислительной метамоделей деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 16-25.
12. Рейзмунт Е.М. Особенности деформированного состояния отражающих сегментов зеркала рефлектора при внешних температурных воздействиях / Решетневские чтения: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева: в 2 ч. / под общ. ред. Ю.Ю. Логинова. Красноярск: СибГУ им. М.Ф. Решетнева. 2017. Ч. 1. С. 166-167.
13. Reyzmunt E.M., Doronin S.V. Numerical analysis of thermal deformation for constructive variants of mirror segments in a parabolic antenna // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1050 (2018) 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012069.
14. Ожегов С.И., Шведова Н.Ю. Толковый словарь русского языка. М.: ООО «А ТЕМП». 2006. 944 с.
15. Ушаков Д.Н. Толковый словарь современного русского языка. М.: Аделант. 2014. 800 с.

UDK 51-74:004.942

**DIGITAL LOAD MODELS OF PRECISION MIRROR ANTENNA FOR INTELLIGENT SUPPORT OF THE OPERATION STAGE**

**Elena M. Rejzmun**

PhD, Researcher, e-mail: [e.sigova@gmail.com](mailto:e.sigova@gmail.com),

**Sergey V. Doronin**

PhD, Assistant Professor, Leading Researcher, e-mail: [sdoronin@ict.nsc.ru](mailto:sdoronin@ict.nsc.ru),

Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center

for Information and Computational Technologies,

660049, Krasnoyarsk, Russia, Mira avenue, 53.

**Annotation.** The conditions for loading reflector antennas with air flow and thermal effects are considered, taking into account the variability of the spatial position of the structure. A concept is proposed for constructing digital models of the loading of a large-sized precision antenna for ground-based satellite communication systems. Possibilities of their integration into decision-making contours for intelligent support of the operation stage have been determined.

**Keywords:** digital load model, antenna, life cycle support.

REFERENCES

1. Selezneva E.V., Lur'e I.K., Panin A.V. Sozdanie i issledovanie cifrovyyh modelej rel'efa dlja rekonstrukcii paleorel'efa ostrova Por-Bazhyn [Creation and Research of Digital Elevation Models for Reconstruction of the Paleorelief of the Por-Bazhyn Island] / Geoinformatika = Geoinformatics. № 3. 2009. Pp. 37-44. (in Russian).
2. Nafieva E.N., Grechishchev A.V. Postroenie cifrovoj modeli rel'efa metodom radiolokacionnoj interferometrii [Creation of a Digital Elevation Model by the Method of Radar Interferometry] // Ecology Economy Informatics. Geoinformation Technologies and Space Monitoring. 2020. Vol. 2. № 5. Pp. 96-103. (in Russian).
3. Olejnik A.M., Vazhenin D.P. Primenenie cifrovoj modeli mestnosti pri geodezicheskom obespechenii stroitel'stva transportnyh razvjazok [Application of a digital terrain model for geodetic support of traffic intersections] // Vestnik nauchnyh konferencij = Scientific conference bulletin. 2019. № 5-3 (45). Pp.68-70. (in Russian).
4. Farber S.K., Kuzmik N.S. Formirovanie cifrovoj modeli vlazhnosti pochv na osnove pokazatelej rel'efa mestnosti i po materialam lesoustrojstva [Formation of a Digital Elevation Model of Soil Moisture Adopted from Terrain Parameters and Forest Management Materials] // Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal. 2020. № 4. Pp. 53-67. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-4-53-67. (in Russian).
5. Nursultanova S. N., Smatullina A. B. Postroenie cifrovoj geologicheskoy modeli mestorozhdenija s. Nurzhanov [Construction of a Digital Geological Model of the Field s. Nurzhanov] // Geologiya i okhrana nedr = Geology and bowels of the earth. 2018. № 4 (69). Pp. 53-57. (in Russian).
6. Glazunova E.M., Savos'kin E.M. Matematicheskaja model' processa sozdaniya cifrovoj modeli stopy v rezul'tate ee beskontaktnogo skanirovanija [The Mathematical Model of the Process of Creating a Digital Foot Model as a Result of its Contactless Scanning] // «Sovremennye informacionnye tehnologii v obrazovanii, nauke i promyshlennosti». Sbornik trudov VI mezhdunarodnoj konferencii: IV mezhdunarodnyj konkurs nauchnyh i nauchno-metodicheskikh rabot = "Modern information technologies in education, science and industry." Proceedings of the VI International Conference: IV International Competition of Scientific and Scientific Methodological Works. Mezhdunarodnaja akademija

- informatizacii, Moskovskij gosudarstvennyj universitet tehnologij i upravlenija imeni K.G. Razumovskogo International Informatization Academy, K.G. Razumovsky Moscow State University of Technology and Management. 2016. Pp. 29-32. (in Russian).
7. Guryeva Yu.A. BIM-tehnologii v stroitel'nom komplekse: zarubezhnyj i otechestvennyj opyt [BIM Technologies in the Construction Industry: Foreign and Domestic Experience] // BIM-modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury: materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = BIM in Construction and Architecture: Proceedings of III International Conference. Sankt-Peterburg: SPbGASU = St. Petersburg: SPbGASU. 2020. Pp. 62-68. DOI: 10.23968/BIMAC.2020.006. (in Russian).
  8. Chernykh A.G., Korolkov D.I., Pakina A.S. Algoritm rascheta ostatochnogo resursa stroitel'nyh konstrukcij pri sozdanii informacionnoj modeli zdaniya ili sooruzhenija [Algorithm to Calculate the Residual Operating Life of Building Constructions When Creating an Information Model of a Building or Structure] // BIM-modelirovanie v zadachah stroitel'stva i arhitektury: materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = BIM in Construction and Architecture: Proceedings of III International Conference. Sankt-Peterburg: SPbGASU = St. Petersburg: SPbGASU. 2020. Pp. 174-180. DOI: 10.23968/BIMAC.2020.021. (in Russian).
  9. Konovalova G.I. Model' operativnogo upravlenija mashinostroitel'nym predpriyatiem v uslovijah cifrovogo proizvodstva [Model of Engineering Enterprise Online Control under Digital Production Conditions] // Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Bulletin of the Bryansk State Technical University. 2019. № 5 (78). Pp. 79-85. DOI: 10.30987/article\_5cda64cfa6d2e9.23311329. (in Russian).
  10. Prikladnye zadachi konstrukcionnoj prochnosti i mehaniki razrushenija tehničeskikh system [Applied problems of structural strength and fracture mechanics of technical systems] / V.V. Moskvichev, N.A. Mahutov, Ju.I. Shokin, A.M. Lepihin and others. Novosibirsk: Nauka = Novosibirsk: Science. 2021. 796 p. (in Russian).
  11. Doronin S.V. Reizmunt E.M. Filippova Yu.F. Postroenie informacionno-vychislitel'noj metamodeli deformirovanija i razrushenija strukturno-slozhnyh konstrukcij [Creation an Informational-Computational Metamodel of Deformation and Destruction of Structurally Complex Constructions] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2019. № 2 (14). Pp. 16-25. (in Russian).
  12. Reizmunt E. M. Osobennosti deformirovannogo sostojanija otrazhajushhih segmentov zerkala reflektora pri vneshnih temperaturnyh vozdeystvijah [The Deformed State Features of the Reflector Mirror Segments at External Temperature Impact] // Reshetnevskie chtenija: materialy XXI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii = Reshetnev Readings: Materials of the XXII International Scientific and Practical Conference. Krasnojarsk: SibGU im. M.F. Reshetneva = Krasnojarsk: Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. 2017. Part 1. Pp. 166-167. (in Russian).
  13. Reizmunt E.M., Doronin S.V. Numerical analysis of thermal deformation for constructive variants of mirror segments in a parabolic antenna // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1050 (2018) 012069. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012069.
  14. Ozhegov S.I., Shvedova N.Ju. Tolkovyj slovar' russkogo jazyka [Explanatory Dictionary of the Russian Language]. Moscow. OOO «A TEMP» = A TEMP. 2006. 944 p. (in Russian).
  15. Ushakov D.N. Tolkovyj slovar' sovremennogo russkogo jazyka [Explanatory Dictionary of the Modern Russian Language] Moscow. Adelant = Adelant. 2014. 800 p. (in Russian).