

## ПОСТРОЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕТАМОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СТРУКТУРНО-СЛОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Доронин Сергей Владимирович

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

Рейзмунт Елена Михайловна

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

Филиппова Юлия Федоровна

М.н.с., e-mail: [FilippovaJF@ict.nsc.ru](mailto:FilippovaJF@ict.nsc.ru)

Лаборатория вычислительной механики и риск-анализа,  
Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал,  
660049 г. Красноярск, пр. Мира 53

**Аннотация.** Рассматривается обобщенный подход к анализу деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций, включающий в себя выполнение декомпозиции и разработку структурной модели конструкции, анализ возможных сценариев повреждения и разрушения, декомпозицию задач расчетного анализа и конструирование на этой базе вычислительной модели деформирования и разрушения. Прикладной характер результатов выражается в получении адаптивных (суррогатных) моделей, основанных на результатах вычислительных экспериментов, применяемых при информационной поддержке жизненного цикла конструкций.

**Ключевые слова:** структурно-сложные конструкции, информационные и вычислительные модели, декомпозиция

**Цитирование:** Доронин С.В., Рейзмунт Е.М., Филиппова Ю.Ф. Построение информационно-вычислительной метамодеи деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 2 (14). С. 16–25. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-2-02

**Введение.** В научно-технической литературе встречается понятие «структурно-неоднородная конструкция», которое, на наш взгляд, не несет существенной семантической нагрузки понятия [2]. Сформулированное определение «структурно-неоднородная конструкция – техническая система, состоящая из неоднородных (неодинаковых) элементов, объединенных неоднородными (неодинаковыми) связями» [2] является предпосылкой построения информационных моделей многоуровневых процессов накопления повреждений в предположении, что известно напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции, как один из важнейших факторов и движущих сил развития повреждений. Вместе с тем, сложность и многовариантность взаимодействий между элементами порождают многообразие напряженных состояний, исследование которых требует обоснования общего методического подхода к анализу деформирования, накопления повреждений и разрушения. В связи с этим целесообразна формулировка более общего определения объекта исследования, подчеркивающего системный характер взаимосвязей

структуры системы и ее возможных состояний: структурно-сложная конструкция – иерархически организованная механическая система, характеризующаяся многообразием элементов, неоднородностью горизонтальных и вертикальных связей и взаимодействий между ними, порождающих большое количество напряженно-деформированных и поврежденных состояний. Структурная сложность включает в себя структурную неоднородность и является более общим и универсальным понятием, фактически предопределяющим необходимость использования методологии и технологий системного анализа при прогнозировании свойств и поведения, в том числе разрушения конструкций сложных технических объектов.

**1. Краткий обзор современного состояния подходов к разрушению сложных систем.** О разрушении сложных систем говорят не обязательно применительно к механическим конструкциям. Под разрушением систем любой природы понимают изменения ее структуры, вызванные внешними или внутренними возмущениями, и приводящие к нарушению работоспособности системы [3, 5]. Для описания такого изменения, как правило, используются формализованные модели преимущественно в виде графов. Наиболее плодотворными такие модели оказались при анализе и прогнозировании надежности систем [7]. Частично они используются применительно к механическим конструкциям, однако в этом случае обязательным условием является принятие во внимание физико-технических явлений и процессов, приводящих к деградации и нарушению работоспособности [6, 9]. Рассмотрение постановок задач не только анализа надежности, но и прогнозирования комплекса свойств и поведения конструкций технических объектов привело к необходимости системного междисциплинарного изучения взаимосвязи явлений и процессов деградации и разрушения деталей и элементов конструкций [1, 4, 12, 14]. Однако полноценный учет взаимодействия как деталей и элементов конструкций, так и процессов их деградации в рамках подходов механики, оказывается затруднительным. Это приводит к необходимости интеграции разнородных информационных, вычислительных технологий и методов анализа систем [8, 13].

Таким образом, хорошо развитые формализованные, но абстрактные модели и методы, развитые в теории и технологиях системного анализа, сталкиваются с серьезными затруднениями при попытке их применения к структурно-сложным конструкциям. Исследования, направленные на преодоление этих затруднений, приводят как к получению новых знаний о свойствах и поведении конструкций, так и к развитию специфических моделей и методов прикладного системного анализа технических объектов. Возможный вариант подхода к таким исследованиям, заключающийся в развитии информационно-вычислительной метамоделей деформирования и разрушения, рассматривается в настоящей работе.

**2. Мета модель деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций.** Как известно, при многомасштабном моделировании рассматриваются несколько уровней деформирования. При рассмотрении машин и конструкций на макроуровне обычно рассматриваются процессы деформирования и разрушения, локализованные в макрообъектах – деталях и элементах конструкций. При анализе структурно-сложных конструкций затруднительно, не выходя за пределы макроуровня, в полной мере учесть процессы системного взаимодействия макрообъектов. Необходим выход на более высокий уровень, который условно можно назвать механикой систем. Он может

быть осуществлен с использованием понятия метамодели, представляющей собой информационную модель более высокого уровня абстракции, описывающей структуру и принципы действия других моделей.

Под метамоделированием деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций будем понимать область знаний и деятельности, связанную с изучением условий возникновения и особенностей постановок задач, обоснованием системы моделей, которая могла бы адекватно описать природу процессов и явлений, протекающих в деформируемых и повреждаемых конструкциях, их эволюцию в пространстве и во времени в течение жизненного цикла.

Определена структура метамодели деформирования и разрушения конструкций на уровне механики систем, минимально необходимая для явного учета взаимодействия деталей и элементов конструкций при их деформировании и разрушении. Метамодель включает в себя структурные модели конструкции, информационные модели сценариев повреждения и разрушения (семантические сети каузального типа [2]), под управлением которых выполняются декомпозиция и содержательная (вербальная) постановка задач расчетного анализа. Вычислительные модели для решения этих задач конструируются с использованием вычислительных моделей деформирования и разрушения сплошных сред с учетом особенностей структуры и сценариев повреждения и разрушения конструкции. В конечном итоге выполняется построение обобщающих суррогатных моделей, обеспечивающих снижение размерности задач и эффективный анализ системных эффектов поведения конструкций в штатных и нештатных условиях функционирования, в том числе при наличии развивающихся дефектов и повреждений (рис. 1).



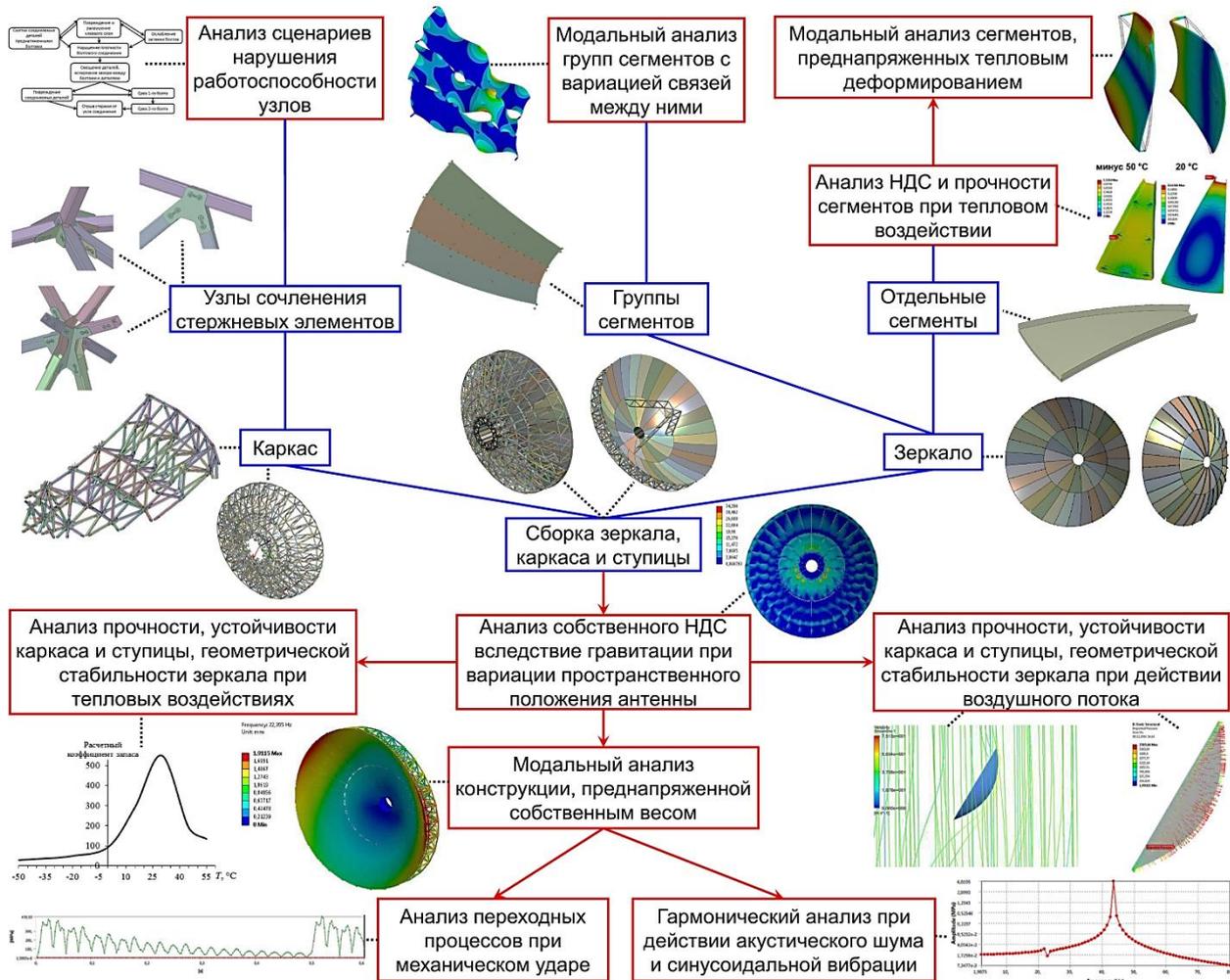
**Рис. 1.** Структура информационно-вычислительной метамодели деформирования и разрушения структурно-сложной конструкции

Структура информационно-вычислительной метамодели деформирования и разрушения является универсальной и применима к любому объекту. Метамодельный подход предполагает обоснование принципов и методов сборки вычислительной модели деформирования и разрушения структурно-сложных конструкций и в настоящее время слабо формализован. Очевидным представляется, что характер декомпозиции задач расчетного анализа должен порождаться структурой конструкции и сценариями повреждения и

разрушения, а вычислительные модели, конструируемые на основе этой декомпозиции, должны описывать поведение деградирующей конструкции и давать возможности оценивать последствия реализации отдельных ветвей обобщенного сценария.

Рассмотрим далее некоторые примеры, иллюстрирующие отдельные аспекты рассматриваемого подхода, на примере конструкции крупногабаритной прецизионной антенны наземных систем спутниковой связи и отдельных ее подсистем.

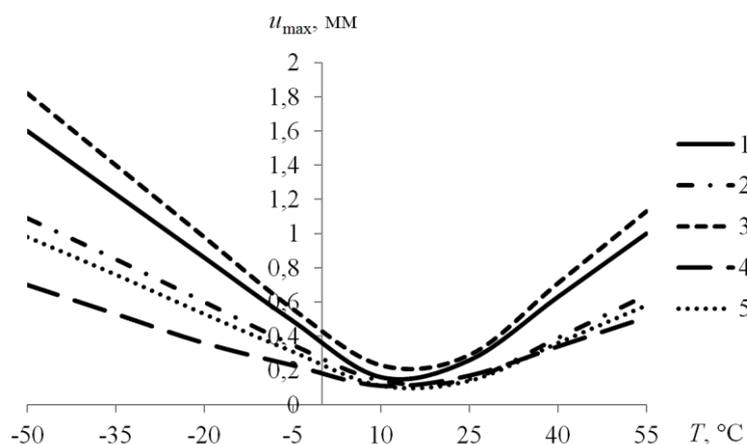
**3. Декомпозиция задач расчетного анализа деформирования и разрушения конструкции антенны наземных систем спутниковой связи.** С учетом структурной сложности объекта и многообразия внешних воздействий обоснована декомпозиция конструкции (на рис. 2 они представлены блоками: узлы сочленения, группы сегментов, отдельные сегменты, каркас, зеркало и сборка) и задач расчетного анализа, решение которых является информационным обеспечением поиска оптимальных технических вариантов и достижения заданных значений прочности и формостабильности.



**Рис. 2.** Схема декомпозиции конструкции и задач расчетного анализа структурно-неоднородной конструкции зеркальной антенны

В результате решения этих задач получены большие массивы количественных данных, обработка которых как обеспечивает информационную поддержку задач практической оптимизации, так и позволяет строить модели для прогнозирования поведения конструкции.

**4. Адаптивная (суррогатная) модель деформирования сегментов зеркала.** В процессе анализа и обоснования конструктивных вариантов рассматривались пять различных типоразмеров сегментов зеркала антенны, с позиций механики представляющих собой многоопорные (от пяти до восьми опор) трехслойные параболические оболочки. Анализ теплового деформирования выполняется по результатам численного решения сопряженной задачи стационарной теплопроводности в условиях радиационно-конвективного теплообмена и термоупругости [15]. В качестве интегрального показателя деформирования рассматриваются максимальные абсолютные деформации (суммарные поступательные перемещения) поверхности сегмента  $u_{\max}$  в зависимости от температуры окружающей среды  $T$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Зависимости максимальных перемещений оболочек пяти типоразмеров

На основании полученных зависимостей построена обобщающая суррогатная модель, имеющая вид

$$u_{\max}(T) \in [u_{\max}(T); \bar{u}_{\max}(T)];$$

$$\underline{u}_{\max}(T) = -8 \cdot 10^{-10} T^5 - 2 \cdot 10^{-8} T^4 + 4 \cdot 10^{-6} T^3 + 0,0002 T^2 - 0,0075 T + 0,1730;$$

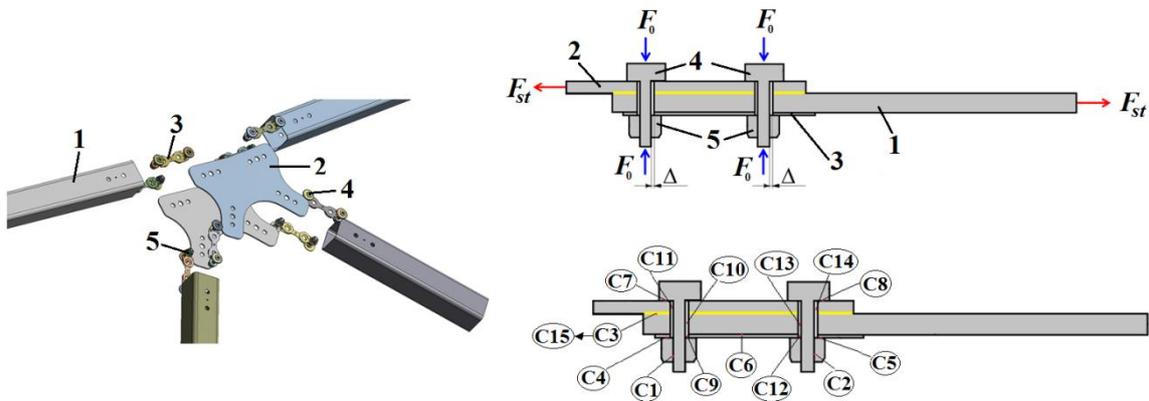
$$\bar{u}_{\max}(T) = -2 \cdot 10^{-9} T^5 - 4 \cdot 10^{-8} T^4 + 1 \cdot 10^{-5} T^3 + 0,0005 T^2 - 0,0237 T + 0,4161,$$

где  $\underline{u}_{\max}(T)$ ,  $\bar{u}_{\max}(T)$  — соответственно нижняя и верхняя границы интервала зависимостей  $u_{\max}$  от температуры окружающей среды.

**5. Вычислительная модель деформирования и разрушения узла сочленения силового каркаса.** Каркас представляет собой пространственную стержневую конструкцию из труб квадратного поперечного сечения размером 60×60 мм. Соединение труб осуществляется с использованием фитингов посредством болтовых и клеевого соединений.

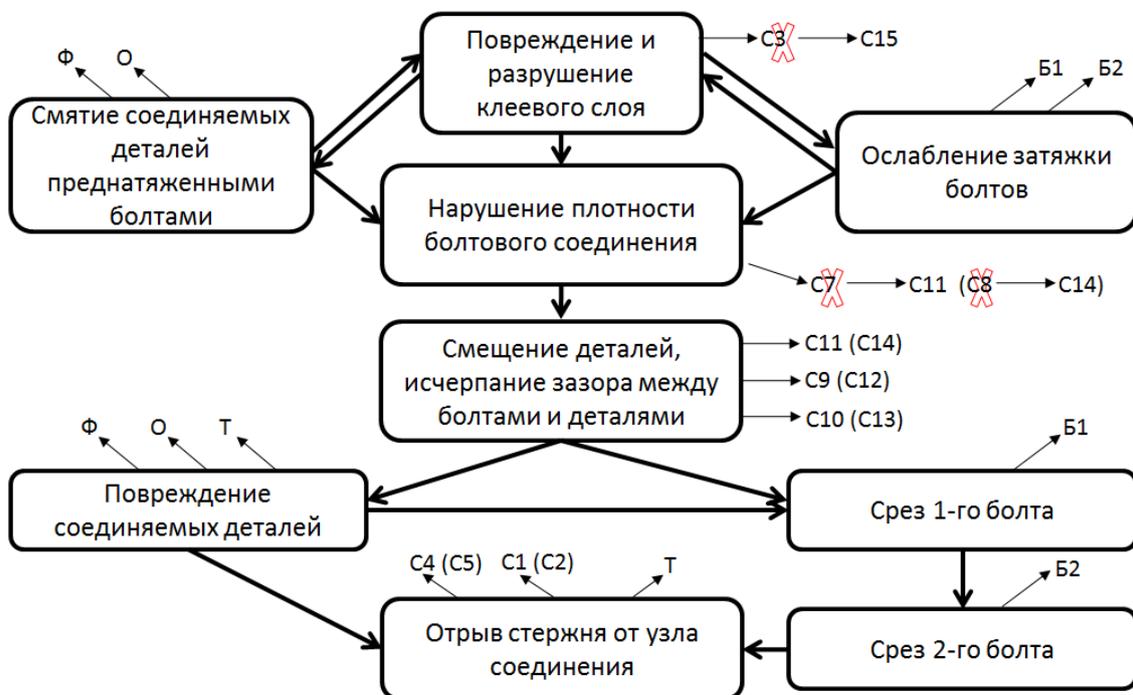
Процедура построения структурной и информационной моделей конструкции заключается в анализе совместной работы элементов конструкции и их системных взаимосвязей при работе как в штатном, так и в поврежденном состоянии. Для конкретизации рассмотрим элементарный, повторяющийся фрагмент узла сочленения стержней каркаса. Он включает в себя трубу из однонаправленного и фитинг из тканого полимерного композиционного материала, стальные обойму, болты и гайки (рис. 4).

Несмотря на небольшое число конструктивных элементов, объединение их в систему осуществляется с помощью разнородных физико-технических связей: резьбовых и клеевых соединений, фрикционных взаимодействий. Это формирует высокую степень структурной неоднородности конструкции.



**Рис. 4.** Структурная схема (модель) узла сочленения трубы с фитингом:  
 1 – труба; 2 – фитинг; 3 – обойма; 4 – болт; 5 – гайка; C1, C2 – резьбовые соединения;  
 C3 – клеевое соединение; C4-C15 – фрикционные взаимодействия;  $\Delta$  – зазор

Информационная модель деформирования и разрушения представляет собой семантическую сеть каузального типа, являющуюся сценарием многоуровневого процесса накопления повреждений (рис. 5) [10]. С вершинами графа, описывающими повреждения, ассоциируются конструктивные элементы, в которых эти повреждения локализованы. Крест обозначает разрушение (исчезновение) одних и возникновение других связей между элементами.

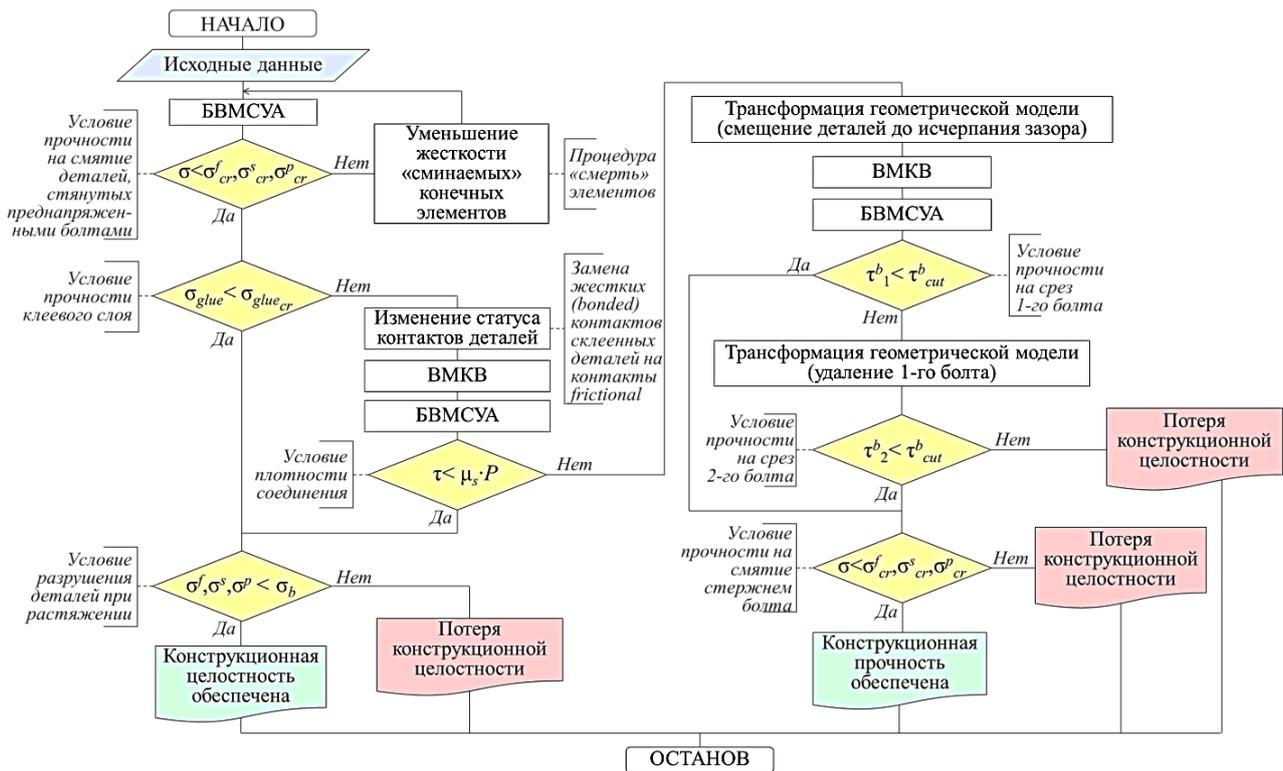


**Рис. 5.** Многоуровневая модель разрушения узла сочленения:

О – обойма; Ф – фитинг; Т – труба; B1, B2 – болты

Применительно к рассматриваемой конструкции вычислительная модель неповрежденной конструкции включает в себя базовые разрешающие уравнения и алгоритм метода конечных элементов в перемещениях (БВМСУА – базовая вычислительная модель

статического упругого анализа), а также нелинейные процедуры решения трехмерной контактной задачи теории упругости с переменной зоной контакта с трением (ВМКВ - вычислительная модель контактного взаимодействия). Формулировка численной (конечно-элементной) модели узла сочленения включает в себя два шага нагружения. На первом шаге задается предварительное натяжение болтов и определяется начальное (собственное) напряженное состояние механической системы. На втором реализуется итерационный алгоритм решения нелинейной контактной задачи. Для моделирования накопления повреждений и разрушения вычислительная модель включает в себя проверки условий прочности и процедуры изменения статуса контактов, изменения жесткости конструкционных материалов и трансформации (модификации) геометрической модели (рис. 6).



**Рис. 6.** Логическая схема вычислительной модели накопления повреждений и разрушения узла сочленения каркаса антенны:  $\sigma_{cr}^f, \sigma_{cr}^s, \sigma_{cr}^p$  – соответственно прочность на смятие фитинга, обоймы, трубы;  $\sigma$  – максимальное эквивалентное напряжения в зоне контакта;  $\sigma_b$  – временное сопротивление разрушению материала;  $\sigma_{glue}$  – эквивалентные напряжения в клеевом слое;  $\sigma_{glue_{cr}}$  – прочность клеевого слоя;  $\mu_s$  – коэффициент трения покоя;  $\tau$  – предельное касательное напряжение трения;  $P$  – нормальное контактное давление;  $\tau^b$  – максимальное касательное напряжение в сечении болта;  $\tau^b_{cut}$  – предел прочности материала болта на срез

Практическая реализация вычислительной модели позволила установить состояния поврежденности, условия и последовательность их возникновения [11].

**Заключение.** Новизна рассматриваемого подхода заключается в использовании и адаптации приемов и технологий системного анализа к задачам анализа деформирования и разрушения сложных механических систем. Построение информационно-вычислительной метамоделей отличается от известных подходов многоуровневым и многовариантным анализом характера взаимодействия элементов структурно-сложных конструкций в

неповрежденном и поврежденном состояниях. Практическая значимость подхода заключается в принципиальной возможности учета и прогнозирования всех возможных системных эффектов и сценариев поведения повреждаемых конструкций при решении задач управления риском и техногенной безопасности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берман А.Ф. Дegrаdация механических систем. Новосибирск: Наука. 1998. 320 с.
2. Доронин С.В., Рейзмунт Е.М. Информационное и семантическое моделирование повреждений структурно-неоднородных конструкций // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2018. № 2. С. 71–79.
3. Кочкаров А.А., Малинецкий Г.Г. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2005.
4. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск: Наука. 2008. 528 с.
5. Подходы к разрушению сложных систем / Н.В. Акамсина, О.А. Коновалов, Л.А. Коробова, Ю.С. Сербулов // Лесотехнический журнал. 2016. № 2. С. 189–195.
6. Похабов Ю.П. Проектирование сложных изделий с малой вероятностью отказов в условиях Индустрии 4.0 // Онтология проектирования. 2019. № 1. С. 24–35.
7. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Политехника. 2000. 248 с.
8. Семенов А.С., Мельников Б.Е. Многомодельный анализ неупругого деформирования материалов и элементов конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 6. С. 63–67.
9. Тимашев С.А. Надежность больших механических систем. М.: Наука. 1982. 184 с.
10. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Information model of damage accumulation and survivability for a joint assembly of a beam skeleton // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 2053. 040017-1–040017-4. <https://doi.org/10.1063/1.5084455>
11. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Modeling of the Multi-Level Process of Damage Accumulation in a Reflector Skeleton with An Inhomogeneous Structure [Electronic resource] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2018. Iss. 6. Pp. 191–202. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.191-202.
12. Emergence, analysis and evolution of structures: concepts and strategies across disciplines / Ed. by Klaus Lucas and Peter Roosen. Springer – Verlag Dordrecht London New York.
13. Forrester A.I.J., Sóbester A., Keane A.J. Engineering design via surrogate modeling: a practical guide. John Wiley & Sons, Ltd. 2008.
14. McEvily A.J. Metal failures: mechanisms, analysis, prevention / John Wiley & Sons, Inc, New York. 2002.
15. 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.

**UDK 004.942**

**CREATION AN INFORMATIONAL-COMPUTATIONAL METAMODEL OF  
DEFORMATION AND DESTRUCTION OF STRUCTURALLY COMPLEX  
CONSTRUCTIONS**

**Sergey V. Doronin**

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

**Elena M. Reizmunt**

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

**Yulia F. Filippova**

Junior Researcher, e-mail: [FilippovaJF@ict.nsc.ru](mailto:FilippovaJF@ict.nsc.ru)

Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis,  
Institute of Computational Technologies Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Krasnoyarsk Branch Office, 53, Mira avenue, 660049, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract.** We consider a generalized approach to the analysis of deformation and destruction of structurally complex constructions, which includes decomposition and the development of a structural model of a construction, analysis of possible damage and destruction scenarios, decomposition of computational analysis tasks and design of a computational model of deformation and destruction on this base. The applied nature of the results is expressed in obtaining adaptive (surrogate) models based on the results of computational experiments used with information support of the constructions life cycle.

**Keywords:** structurally complex constructions, informational and computational models, decomposition.

**References**

1. Berman A.F. Degradacija mehanicheskikh system [Degradation of mechanical systems]. Novosibirsk. "Nauka" Publ. 1998. 320 p. (in Russian)
2. Doronin S.V., Reizmunt E.M. Informacionnoe i semanticheskoe modelirovanie povrezhdenij strukturno-neodnorodnykh konstrukcij [Information and semantic modeling of damage to structurally inhomogeneous structures] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2018. No 2. Pp. 71–79 (in Russian)
3. Kochkarov A.A., Malineckij G.G. Obespechenie stojkosti slozhnykh sistem. Strukturnye aspekty [Ensuring the durability of complex systems. Structural aspects] // Preprint Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences). Moscow. 2005. (in Russian)
4. Makhutov N.A. Prochnost' i bezopasnost': fundamental'nye i prikladnye issledovaniya [Strength and safety: basic and applied research]. Novosibirsk. "Nauka" Publ. 2008. 528 p. (in Russian)
5. Podkhody k razrusheniyu slozhnykh system [Approaches to the destruction of complex systems] Akamsina N.V., Kononov O.A., Korobova L.A., Serbulov Yu.S. // Lesotekhnicheskij zhurnal = Forestry journal. 2016. No 2. Pp. 189-195. (in Russian)

6. Pokhabov Yu.P. Proektirovanie slozhnykh izdeliy s maloy veroyatnost'yu otkazov v usloviyakh Industrii 4.0 [Designing complex products with a low probability of failure in Industry 4.0.] // *Ontologiya proektirovaniya = Design Ontology*. 2019. No 1. Pp. 24–35. (in Russian)
7. Ryabinin I.A. Nadezhnost' i bezopasnost' strukturno-slozhnykh sistem [Reliability and safety of structurally complex systems] Saint Petersburg: “Politekhnik” Publ., 2000. 248 p. (in Russian)
8. Semenov A.S., Mel'nikov B.E. Mnogomodel'nyy analiz neuprugogo deformirovaniya materialov i elementov konstruktsiy [Multi-model analysis of inelastic deformation of materials and structural elements] // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy = Construction mechanics and construction calculations*. 2007. No 6. Pp. 63–67. (in Russian)
9. Timashev S.A. Nadezhnost' bol'shikh mekhanicheskikh sistem [Reliability of large mechanical systems]. Moscow. “Nauka” Publ. 1982. 184 p. (in Russian)
10. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Information model of damage accumulation and survivability for a joint assembly of a beam skeleton // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2053. 040017-1–040017-4. <https://doi.org/10.1063/1.5084455>
11. Doronin S.V., Filippova Yu.F. Modeling of the Multi-Level Process of Damage Accumulation in a Reflector Skeleton with An Inhomogeneous Structure [Electronic resource] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. 2018. Iss. 6. Pp. 191–202. DOI: 10.17804/2410-9908.2018.6.191-202.
12. *Emergence, analysis and evolution of structures: concepts and strategies across disciplines* / Ed. by Klaus Lucas and Peter Roosen. Springer – Verlag Dordrecht London New York.
13. Forrester A.I.J., Sóbester A., Keane A.J. *Engineering design via surrogate modeling: a practical guide*. John Wiley & Sons, Ltd. 2008.
14. McEvily A.J. *Metal failures: mechanisms, analysis, prevention* / John Wiley & Sons, Inc, New York. 2002.
15. 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.