



Цифровые модели повреждаемых стержневых систем для интеллектуальной поддержки их жизненного цикла

© 2025, С.В. Доронин ✉, Ю.Ф. Филиппова

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, Красноярск, Россия

Аннотация

Рассматривается вариант интеллектуальной поддержки жизненного цикла повреждаемых стержневых систем, а именно, информационное обеспечение принятия решений в слабоструктурированных ситуациях на стадии эксплуатации. Эти ситуации характеризуются необходимостью обоснования технических решений в сжатые сроки при отсутствии знаний о напряжённом состоянии и остаточной несущей способности повреждённой конструкции. Информационное обеспечение заключается в получении априорных данных о состоянии конструкции в случае разрушения каждого из её структурных элементов и сводится к построению цифровых моделей напряжённого состояния повреждаемой конструкции. Для типовой слабоструктурированной ситуации определено содержание задач принятия решений, каждой из которых поставлены в соответствие вопросы, требующие ответа. Эти вопросы обуславливают требования к содержанию цифровых моделей повреждаемых стержневых систем. Снижение неопределённости в слабоструктурированной ситуации осуществляется путём выполнения последовательности действий «оценка ситуации → анализ содержания задач принятия решений → формулировка вопросов и обоснование требований к цифровым моделям → многовариантное вычислительное моделирование и построение цифровых моделей для информационного обеспечения решений». Построение цифровых моделей предшествует эксплуатации стержневых систем и осуществляется путём многовариантного вычислительного моделирования разрушения структурных элементов и анализа его влияния на напряжённое состояние конструкции. Новизна заключается в том, что для повреждаемых стержневых конструкций установлено однозначное соответствие между задачами принятия решений относительно возможности их безопасной эксплуатации и технологиями имитации разрушения структурных элементов.

Ключевые слова: цифровые модели, вычислительный эксперимент, стержневые системы, интеллектуальная поддержка решений, жизненный цикл, безопасность эксплуатации.

Цитирование: Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф. Цифровые модели повреждаемых стержневых систем для интеллектуальной поддержки их жизненного цикла. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №3(57). С.449-458. DOI:10.18287/2223-9537-2025-15-3-449-458.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий.

Вклад авторов: Доронин С.В. – концепция построения и использования цифровых моделей поведения конструкций для поддержки жизненного цикла. Филиппова Ю.Ф. – обоснование и компьютерная реализация технологий имитации разрушения структурных элементов стержневых систем.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

В настоящее время общепризнана фактическая невозможность обеспечения безотказности технических объектов в течение их жизненного цикла (ЖЦ). Это связано с протеканием естественных деградиционных процессов накопления повреждений [1], невозможностью учёта на стадии проектирования всех возможных воздействий и событий, оказывающих влияние на работоспособность объектов, исключения дефектов конструкционных материалов при изготовлении [2]. Под повреждаемыми понимаются конструкции, в которых на стадии

эксплуатации нарушаются условия прочности, возникает, развивается и завершается процесс разрушения, в результате чего конструкция становится повреждённой. Свойства конструкций в повреждённом состоянии слабо изучены и высока опасность непрогнозируемого их поведения, приводящего к нарушению работоспособности, в т.ч. к тяжёлым авариям и катастрофам. В связи с этим актуальны исследования, направленные на изучение свойств повреждаемых конструкций и возможностей включения этих результатов в информационную поддержку ЖЦ технических объектов. Создание цифровых моделей (ЦМ) позволяет осуществлять систематизацию и хранение данных о свойствах повреждаемых конструкций с учётом дискретности принимаемых во внимание факторов и накопленных повреждений.

В настоящей работе для стержневых систем рассматривается взаимосвязь способов имитации разрушения структурных элементов и типов задач, решаемых в течение ЖЦ объектов. От способа имитации разрушения структурных элементов зависит объём и достоверность оценок свойств повреждённых конструкций, что предопределяет возможность использования этих результатов для информационной поддержки задач управления их ЖЦ.

1 Взаимосвязь цифровых моделей и ситуаций принятия решений

Необходимость анализа поведения повреждаемых стержневых систем (ПСС) возникает на стадии их эксплуатации. Информационное обеспечение принятия решений с использованием предварительно подготовленных ЦМ основано на получении решения сложных ресурсоёмких задач анализа напряжённо-деформированного состояния ПСС до момента необходимости использования ЦМ. Эффективность применения ЦМ для информационной поддержки оценки уровня накапливаемых повреждений на стадии эксплуатации показана, например, в [3]. Информационная поддержка принятия решений с использованием заранее подготовленных ЦМ применяется для управления ЖЦ гидроагрегатов [4].

Взаимосвязь ЦМ и ситуаций принятия решений показана на рисунке 1.

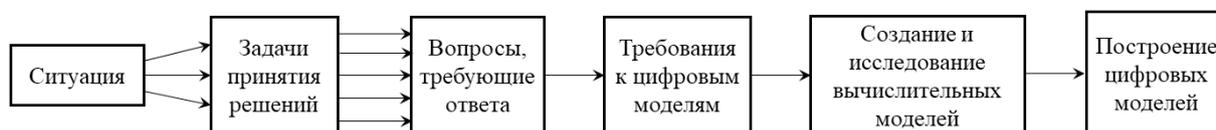


Рисунок 1 – Взаимосвязь цифровых моделей и ситуаций принятия решений

В ситуации принятия решения возникает ряд задач, которые определяют целесообразность одного из альтернативных вариантов действий. Решению этих задач предшествуют формулировка перечня вопросов и содержания ответов на них, а также требований к ЦМ, которые должны обеспечивать получение необходимых ответов. Эти ответы получают путём создания и применения соответствующих ЦМ. Результаты исследований ЦМ могут быть многократно использованы в ситуации быстрого принятия решений в практических задачах.

В качестве одной из типовых ситуаций для ПСС рассматривается разрушение структурного элемента стержневой системы. Для формализации определены следующие множества.

Множество задач принятия решений $A = \{a_1, a_2, a_3\}$ содержит три элемента: оценка работоспособности повреждённой конструкции (a_1), оценка необходимости ремонтно-восстановительных работ (a_2), определение сценария аварийного разрушения (a_3).

Множество $B = \{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5\}$ включает в себя следующие вопросы:

- каковы напряжённое состояние и остаточная прочность конструкции при статическом нагружении? (b_1);
- каковы пиковые напряжения и характер колебаний при динамическом нагружении? (b_2);
- каков характер переходного процесса в момент разрушения стержня и не влечёт ли он каскад разрушений других структурных элементов? (b_3);
- необходимо ли удалять фрагменты разрушенного стержня? (b_4);

- необходимо ли восстанавливать целостность разрушенного стержня? (b_5).

Для ответов на эти вопросы необходимо получить информацию о напряжённом состоянии повреждаемой конструкции. В связи с этим в множество $C = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}$ включены следующие требования к содержанию ЦМ – характеристики напряжённого состояния конструкции при:

- статическом нагружении с учётом изменения жёсткости вследствие разрушения стержня (c_1);
- статическом нагружении с учётом изменения жёсткости и массы вследствие удаления фрагментов разрушившегося стержня (c_2);
- динамическом нагружении с учётом изменения жёсткости вследствие разрушения стержня (c_3);
- динамическом нагружении с учётом изменения жёсткости и массы вследствие удаления фрагментов разрушившегося стержня (c_4);
- импульсном нагружении вследствие мгновенного разрушения стержня (c_5).

В предположении, что каждому требованию соответствует своя ЦМ напряжённого состояния, множество D , так же как и множество C , состоит из пяти элементов: $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4, d_5\}$. Каждая ЦМ в общем случае представляет собой структурированный массив максимальных эквивалентных напряжений σ_{ij} в i -м стержне при разрушении j -го стержня: $d = (\sigma_{ij})$, $i=1, n$, $j=1, n$, где n – количество стержней в системе.

Соответствие между рассматриваемыми множествами (рисунок 2) конкретизирует общий вид взаимосвязи (рисунок 1) для ПСС.

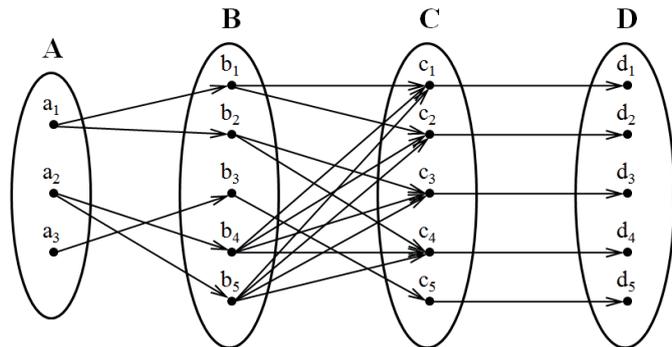


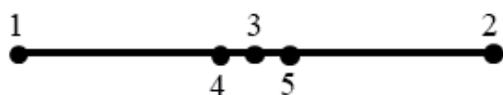
Рисунок 2 – Соответствия между множествами

2 Имитация разрушения структурных элементов стержневых систем

Для выполнения требований (множество C) к содержанию ЦМ (множество D) на стадии их создания и исследования необходимо использование аппарата, позволяющего отразить особенности поведения ПСС в момент разрушения её структурного элемента и в период после разрушения. Для анализа поведения ПСС используются методы механики деформируемого твёрдого тела, геометрические модели, создаваемые в программных комплексах автоматизированного проектирования (*CAD*-пакетах), и численные (конечно-элементные, КЭ) модели, создаваемые в программных системах инженерного анализа.

Возможно применение двух технологий моделирования разрушения стержней: удаление стержня целиком из расчётной схемы (модели) [5-10]; его виртуальное рассечение в поперечном сечении, путём модифицирования геометрической модели (разрезание стержня) средствами используемого *CAD*-пакета или применением к КЭ модели универсальной вычислительной технологии «рождения и смерти элементов» (РСЭ)¹ [11, 12]. Технология РСЭ применяется для моделирования разрушения и повреждения различной природы [11-15] и изменения конфигурации технического объекта при его создании [16]. Она заключается в мгновенном изменении (увеличении при «рождении» или уменьшении при «смерти») жёсткости КЭ. При мгновенном уменьшении жёсткости в «разрушаемом» сечении стержня (одном или нескольких КЭ) он остаётся в КЭ модели (сохраняя неизменным распределение массы), но перестаёт сопротивляться деформациям (что равносильно исключению из силовой схемы).

¹ANSYS 2022R1 Documentation. Houston: SAS Inc., 2022.



1, 2 – концевые точки стержня; 3 – точка «разрезания» стержня, 4, 5 – узловые точки конечного или структурного элемента с уменьшенным значением модуля Юнга

Рисунок 3 – Схема модификации разрушаемого структурного элемента

Указанные технологии поясняются следующей схемой (рисунок 3). Первоначально целостный структурный элемент ограничен точками 1 и 2. Анализ конструкции с удалённым стержнем предполагает исключение стержня 1-2; с рассечённым стержнем – замену стержня 1-2 парой стержней 1-3 и 3-2 с разрывом связи в точке 3. По технологии РСЭ возможны следующие варианты. В разрушаемом сечении стержня 1-2 генерируется «умирающий» КЭ 4-5 с пониженным модулем Юнга. В некоторых случаях возникает

необходимость имитировать технологию РСЭ на геометрической модели. Тогда исходный стержень 1-2 разделяется на три стержня 1-4, 4-5 и 5-2 с заданием для стержня 4-5 свойств материала с уменьшенным модулем Юнга.

Эти технологии могут быть применены к различным типам моделей конструкции: удаление и разрезание стержня возможно только в геометрической (до начала процесса решения), применение технологии РСЭ – в КЭ модели непосредственно в процессе решения задачи.

3 Схема построения цифровых моделей повреждаемых стержневых систем

В настоящем исследовании предполагается работа конструкционного материала в упругой стадии деформирования (запасы прочности неповреждённой конструкции соответствуют нормам проектирования, разрушение стержня является хрупким), что позволяет не учитывать влияние фактора физической нелинейности материала на выбор технологий анализа. Перемещения, возникающие при разрушении стержней, априори не могут считаться малыми, что требует учёта геометрической нелинейности. Разрушение стержней означает изменение расчётной модели конструкции, что является конструктивной (структурной) нелинейностью.

Рассматриваемый тип конструктивной нелинейности порождает динамический процесс, который не может быть исследован в статической постановке. Однако возможно исследование конструкции после завершения динамического процесса, т.е. в статической постановке возможен анализ повреждённых конструкций. Варианты учёта конструктивной нелинейности при построении ЦМ ПСС показаны на рисунке 4.

Геометрически нелинейный статический силовой анализ повреждённой конструкции при разрезании стержня учитывает изменение только жёсткости ПСС и обеспечивает выполнение элемента c_1 множества требований к ЦМ. Этот вариант даёт адекватный физическому состоянию конструкции результат после разрушения стержня (остающегося в ПСС), порождающего дополнительные силовые факторы от изгиба фрагментов разрушившегося стержня.

Геометрически нелинейный статический силовой анализ повреждённой конструкции при удалении стержня учитывает изменение массы и жёсткости ПСС и обеспечивает выполнение элемента c_2 множества требований к ЦМ. Этот вариант соответствует состоянию ПСС после физического удаления фрагментов разрушившегося стержня.

Геометрически нелинейный анализ вынужденных колебаний повреждённой конструкции при удалении и разрезания стержня учитывает изменение отклика вследствие изменения динамических характеристик из-за уменьшения массы и жёсткости (выполнение требования c_4) или только жёсткости (выполнение требования c_3) повреждённой конструкции.

Геометрически и структурно нелинейный анализ переходных процессов ПСС обеспечивает анализ её поведения в момент разрушения и непосредственно после него. Получаемые результаты соответствуют элементу c_5 множества требований к ЦМ.

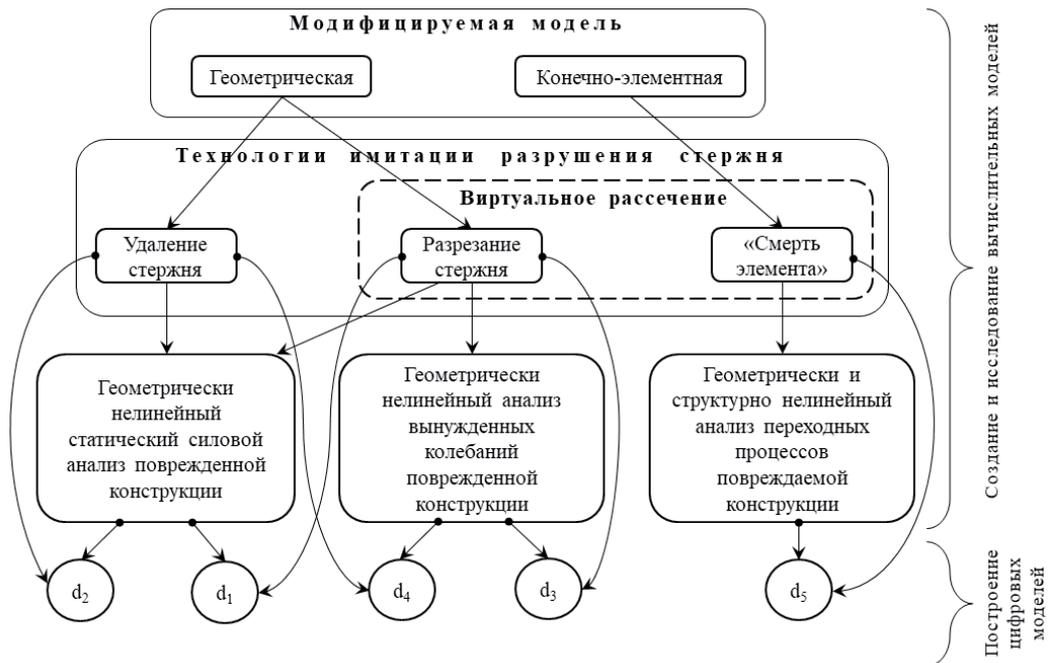
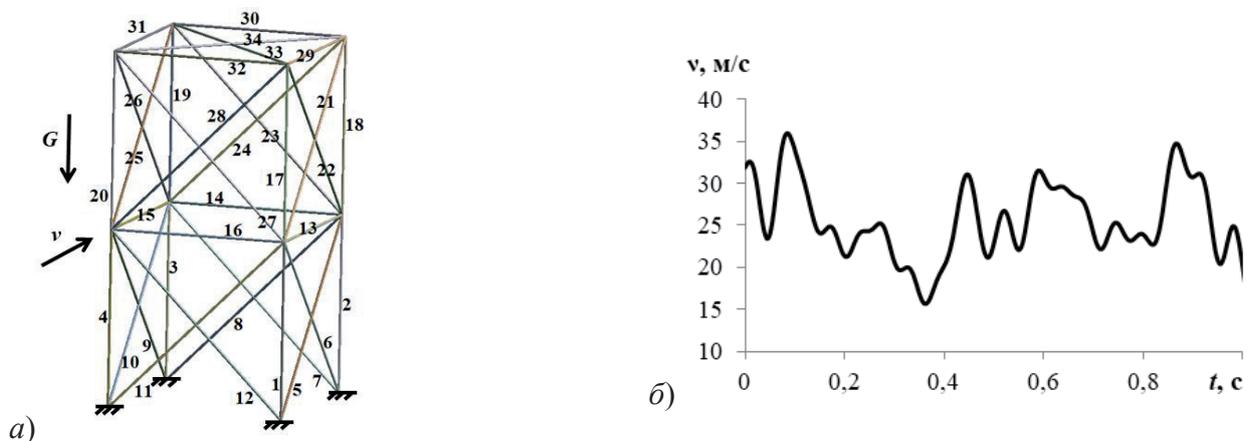


Рисунок 4 – Схема построения цифровых моделей повреждаемых стержневых систем

Таким образом, ЦМ можно рассматривать как продукт систематизации результатов, полученных с использованием рассмотренных технологий имитации разрушенных структурных элементов и выбираемых в связи с необходимостью быстрого получения ответов на заранее сформулированный перечень вопросов.

4 Численный пример

В качестве модельной задачи рассматривается стальная пространственная стержневая система рамного типа с жёсткой заделкой в четырёх точках. Система содержит 34 стержня (рисунок 5а), каждый из которых может быть разрушен. Статическая нагрузка представлена собственным весом G , динамическая – боковым ветром, скорость которого предполагается случайной величиной со значением, характерным для местности размещения конструкции (рисунок 5б). В качестве такого значения принята скорость $v = 25$ м/с.

Рисунок 5 – Схема модельной задачи: а) конфигурация стержневой системы; б) характерный фрагмент изменения скорости ветра v

Компьютерное моделирование динамического нагружения ветром выполнено следующим образом. Статистические исследования [17] скорости ветра независимо от географического расположения местности, высоты над поверхностью почвы и особенностей ландшафта показали, что адекватной вероятностной моделью является закон Вейбулла с функцией распределения

$$F(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{g}\right)^h\right),$$

где g – параметр масштаба; h – параметр формы.

Установлено [17], что в большинстве случаев параметр формы близок к 2. Известно [18], что для распределения Вейбулла математическое ожидание случайной величины определяется с использованием гамма-функции Γ как $\bar{v} = g \cdot \Gamma((h+1)/h)$. Тогда из равенства $\bar{v} = 25 = g \cdot \Gamma((2+1)/2)$ можно найти значение параметра масштаба $g = 25/\Gamma(1,5) \approx 28,1$.

Случайные числа для распределения Вейбулла W : g, h получаются из случайных чисел для равномерного распределения R на интервале $[0,1]$ с помощью соотношения [18]: $W: g, h \rightarrow g \cdot (-\log R)^{1/h}$. Фрагмент сгенерированной таким образом временной зависимости скорости ветра $v = f(t)$ показан на рисунке 5б.

Давление воздушного потока p (Па) в связи со скоростью ветра v (м/с) определяется известным выражением $p = \rho v^2/2$ (ρ – плотность воздуха, кг/м³). В каждый момент времени это давление приложено ко всем стержневым элементам ПСС с учётом угла их наклона по отношению к направлению ветра.

Выполнено пять серий вычислительных экспериментов (каждая серия – отдельная ЦМ), в ходе которых осуществлена имитация разрушения каждого структурного элемента с определением максимальных напряжений σ_{ij} во всех элементах (в т.ч. в разрушенном, если он не удаляется из ПСС). Вычисления выполнены в геометрически нелинейной постановке с использованием пакета КЭ анализа ANSYS: цифровые модели d_1, d_2 получены в модуле *Static Structural*, d_3, d_4, d_5 – в модуле *Transient Structural*. Визуализация цифровых моделей в виде набора таблиц показана на рисунке 6.

Каждый столбец в таблице соответствует i -му структурному элементу модельной конструкции, каждая строка – разрушению j -го структурного элемента. Каждая ячейка таблицы содержит значение эквивалентного напряжения σ_{ij} : например, для ЦМ d_5 в процессе разрушения третьего структурного элемента ($j = 3$) во втором структурном элементе ($i = 2$) максимальные эквивалентные напряжения составляют $\sigma_{23} = 55$ МПа.

Сравнение значений σ_{ij} с величиной временного сопротивления конструкционного материала σ_b представляет собой известный критерий прочности $\sigma_{ij} < \sigma_b$. Возможны два варианта результата оценки: $\sigma_{ij} < \sigma_b$ – прочность обеспечена; $\sigma_{ij} \geq \sigma_b$ – не обеспечена.

Использование полученных ЦМ совместно с критерием прочности в случае разрушения j -го структурного элемента позволяет принять решение о работоспособности повреждённой конструкции (работоспособна, если $\sigma_{ij} < \sigma_b, i = 1, n$), необходимости ремонтно-восстановительных работ (необходимы, если $\sigma_{ij} \geq \sigma_b, i = 1, n$), возможности возникновения каскадных разрушений конструкции (возможны, если $\sigma_{ij} \geq \sigma_b, i = 1, n$). Для принятия решения необходимо извлечение из имеющихся ЦМ значений σ_{ij} и установление одного из двух вариантов выполнения критерия прочности.

Таким образом, построенные ЦМ, обеспечивая исходные данные для анализа условий прочности элементов ПСС, позволяют получить быстрые и достоверные ответы на вопросы множества B и обосновать решения задач множества A .

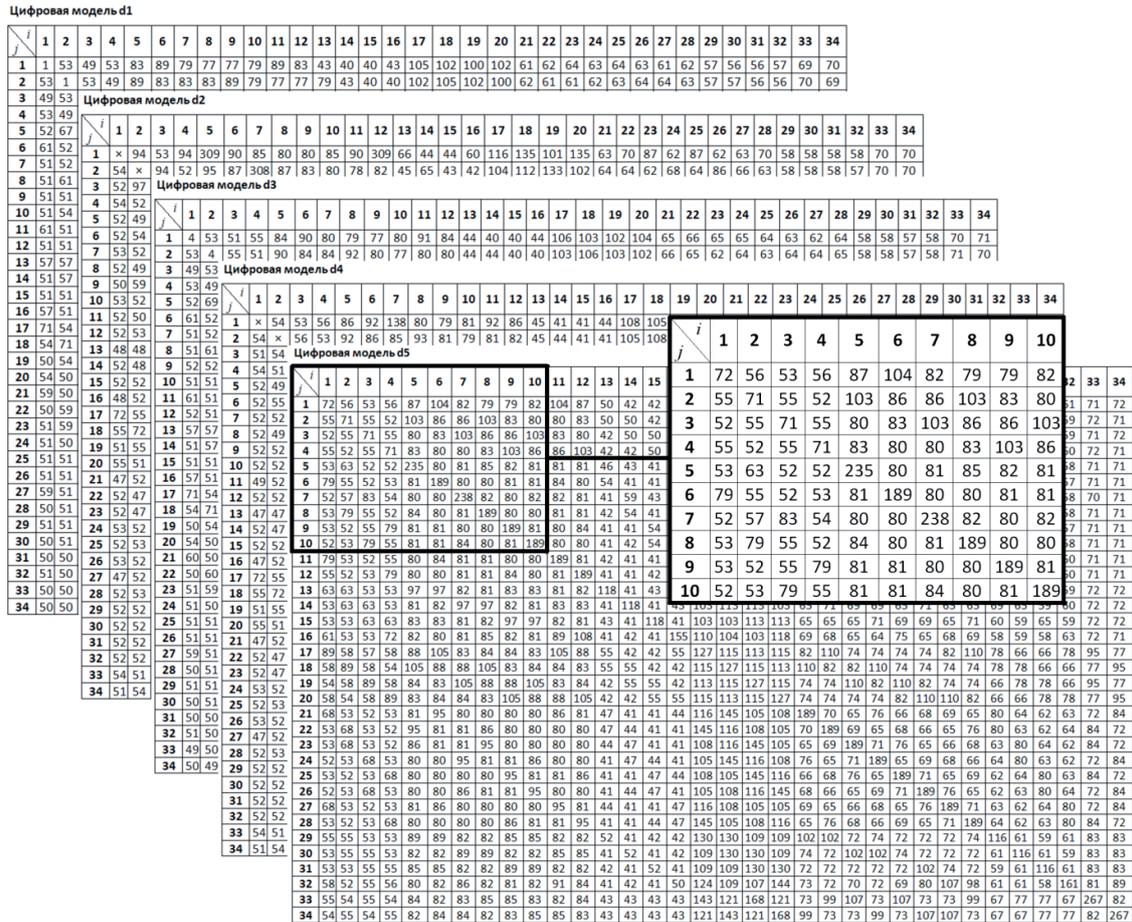


Рисунок 6 – Визуализация цифровых моделей напряжённого состояния повреждаемой конструкции

Заключение

В статье рассмотрен частный случай ПСС, характеризующийся хрупким разрушением отдельных структурных элементов. Предпосылкой построения ЦМ таких систем послужила декомпозиция проблемы принятия решений, касающихся повреждаемой конструкции, и представление её в виде группы трёх задач, для каждой из которых установлена однозначная взаимосвязь с технологиями имитации разрушения стержневых элементов и соответствующих вычислительных моделей. Полученные на этой основе ЦМ представляют собой результат интеллектуальной деятельности, выраженный в законченной самостоятельной форме. Это позволяет считать использование таких ЦМ интеллектуальной поддержкой эксплуатации как одной из стадий ЖЦ ПСС.

Список источников

- [1] Берман А.Ф. Деградация механических систем. Новосибирск: Наука, 1998. 320 с.
- [2] Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем. Новосибирск: Наука, 2003. 174 с.
- [3] 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. С.53-60. DOI: 10.38028/ESI.22.2.005.
- [4] Георгиевская Е.В., Георгиевский Н.В. Цифровой двойник гидроагрегата: новое или хорошо забытое старое? Гидротехника. 2021. №2. С.90-93.

- [5] **Потанов А.Н.** Анализ колебаний конструкций с выключающимися связями. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Строительство и архитектура*. 2017. Т.17, №1. С.38-48. DOI: 10.14529/build170105.
- [6] **Behnam B., Shojaei F., Ronagh H.R.** Seismic progressive-failure analysis of tall steel structures under beam-removal scenarios. *Frontiers of structural and civil engineering*, 2019. Vol.13, Iss.4. P.904-917. DOI: 10.1007/s11709-019-0525-7.
- [7] **Fu Q., Tan K.-H.** Numerical study on steel-concrete composite floor systems under corner column removal scenario. *Structures*. 2019. №21. P.33-44. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.06.003.
- [8] **Izzuddin B.A., Vlassiss A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A.** Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss – Part I: simplified assessment framework. *Engineering structures*. 2008. №30. P.1308-1318. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.011.
- [9] **Li Z.-X., Zhong B., Shi Y., Ding Y., Hao Y.** A computationally efficient numerical model for progressive collapse analysis of reinforced concrete structures. *International journal of protective structures*. 2019. №10(3). P.330-358. DOI: 10.1177/2041419619854768.
- [10] **Naji A.** Comparison of column removal methods in progressive collapse analysis of reinforced concrete moment-resisting frames. *Practice periodical on structural design and construction*. 2019. №24(4). 10 p. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000435.
- [11] **Yang F., Yang J.** Analysis on the dynamic responses of the broken conductors in transmission lines. *Applied mechanics and materials*. 2011. Vol. 50-51. P.511-515. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.50-51.511.
- [12] **Zhang Z., Lin Y., Li H.** Wind-induced progressive collapsed performance of cut-type transmission tower-line system. *Applied mechanics and materials*. 2013. Vol. 353-356. P.2392-2396. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.2392.
- [13] **Chen W., Ye J., Li X.** Thermal behavior of gypsum-sheathed cold-formed steel composite assemblies under fire conditions. *Journal of constructional steel research*. 2018. № 149. P.165-179.
- [14] **Tong L., Li S., Xiong J.** Material parameter modeling and solution technique using birth-death element for notched metallic panel repaired with bonded composite patch. *Chinese journal of aeronautics*. 2014. №27(2). P.445-452. DOI: 10.1016/j.cja.2013.07.031.
- [15] **Xu P., Zheng J.Y., Liu P.F.** Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels. *Materials and design*. 2009. №30. P.2295-2301. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.03.006.
- [16] **Zheng J.** Improved nonlinear analysis method and application of construction mechanics for steel structures. *Journal of engineering research*. 2018. № 6(3). P.16-33.
- [17] **Patel Mukund R.** Wind and Solar Power Systems. L.; N. Y.; Washington, D. C.: CRC Press, 1999. 348 p.
- [18] **Хастингс Н., Пикок Дж.** Справочник по статистическим распределениям. М.: Статистика, 1980. 95 с.

Сведения об авторах



Доронин Сергей Владимирович, 1963 г. рождения. Окончил Красноярский институт цветных металлов им. М.И. Калинина в 1985 г., к.т.н. (1994). Ведущий научный сотрудник лаборатории вычислительной механики и риск-анализа Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий. В списке научных трудов более 200 работ в области прикладной механики и вычислительного моделирования. Author ID (РИНЦ): 116272; Author ID (Scopus): 57193348323; Researcher ID (WoS): V-5470-2017. SDoronin@ict.nsc.ru ✉.

Филиппова Юлия Федоровна, 1987 г. рождения. Окончила Сибирский федеральный университет в 2010 г., к.т.н. (2020). Научный сотрудник лаборатории вычислительной механики и риск-анализа Федерального исследовательского центра информационных и вычислительных технологий. В списке научных трудов около 30 работ. Author ID (РИНЦ): 633598; Author ID (Scopus): 57193351701. Researcher ID (WoS): A-9919-2014. FilippovaJF@ict.nsc.ru.



Поступила в редакцию 08.04.2025, после рецензирования 26.05.2025. Принята к публикации 12.06.2025.



Digital models of damaged rod systems for intelligent support throughout the life cycle

© 2025, S.V. Doronin ✉, Yu. F. Filippova

Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Krasnoyarsk, Russia

Abstract

The article explores an approach to intelligent support for the life cycle of damaged rod systems, focusing on information support for decision-making in poorly structured operational scenarios. Such situations are marked by the need to justify technical solutions within limited timeframes and in the absence of reliable data on the stress state and residual load-bearing capacity of the damaged structure. The proposed information support involves obtaining a priori data on the structural condition under hypothetical failures of individual elements. This is achieved by constructing digital models that represent the stress state of the damaged system. For a typical poorly structured situation, the specific content of the decision-making tasks is identified, with each task linked to a set of key questions that must be answered. These questions in turn define the requirements for the digital models of damaged rod systems. Uncertainty in such weakly structured scenarios is addressed through a stepwise process: “situation assessment → analysis of decision-making content → formulation of key questions and definition of requirements for digital models → multivariate computational modeling and creation of digital models for decision support.” The development of digital models is carried out in advance of system operation and involves computational simulation of the failure of individual structural elements, followed by analysis of their impact on the system's overall stress state. The novelty of the approach lies in establishing a clear correspondence between the tasks of assessing the safe operability of damaged rod structures and the technologies used to simulate the failure of their components.

Keywords: digital models, computational experiment, rod systems, intelligent decision support, life cycle, operational safety.

For citation: Doronin SV, Filippova YuF. Digital models of damaged rod systems for intelligent support throughout the life cycle [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(3): 449-458. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-3-449-458.

Financial Support: The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for Federal Research Center for Information and Computational Technologies.

Authors' Contributions: Doronin S.V. – development of the concept for constructing and applying digital models of structural behavior to support the life cycle of rod systems. Filippova Yu.F. – justification and computational implementation of technologies for simulating the failure of structural elements in rod system.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures

Figure 1 - The relationship between digital models and decision-making situations

Figure 2 - Correspondences between sets

Figure 3 - Modification scheme of a destructible structural element: 1, 2 – end points of the rod; 3 – “cut” point of the rod; 4, 5 – nodal points of the finite or structural element with a reduced value of Young's modulus

Figure 4 - Scheme for constructing digital models of damaged rod systems

Figure 5 - Schematic diagram of the model problem: a) configuration of the rod system; b) a fragment of the wind speed v change

Figure 6 - Visualization of digital models of the stress state of a damaged model structure

References

- [1] *Berman AF*. Degradation of mechanical systems [In Russian]. Novosibirsk: Nauka; 1998. 320 p.
- [2] *Lepikhin AM, Makhutov NA, Moskvichev VV, Chernjaev AP*. Probabilistic risk analysis of technical system designs [In Russian]. Novosibirsk: Nauka; 2003. 174 p.

- [3] **Reizmunt EM, Doronin SV.** Digital models of precision reflector antenna loading for intelligent support of the operational stage [In Russian]. *Information and mathematical technologies in science and management.* 2021; 2: 53-60. DOI: 10.38028/ESI.22.2.005.
 - [4] **Georgievskaja EV, Georgievskij NV.** Digital twin of a hydroelectric unit: new or well-forgotten old? [In Russian]. *Hydraulic engineering.* 2021; 2: 90-93.
 - [5] **Potapov AN.** Analysis of vibrations of structures with switching connections [In Russian]. *Bulletin of SUSU. Series: Construction and architecture.* 2017; 17(1): 38-48. DOI: 10.14529/build170105.
 - [6] **Behnam B, Shojaei F, Ronagh HR.** Seismic progressive-failure analysis of tall steel structures under beam-removal scenarios. *Frontiers of structural and civil engineering.* 2019; 13(4): 904-917. DOI: 10.1007/s11709-019-0525-7.
 - [7] **Fu Q, Tan K.-H.** Numerical study on steel-concrete composite floor systems under corner column removal scenario. *Structures.* 2019; 21: 33-44. DOI: 10.1016/j.istruc.2019.06.003.
 - [8] **Izzuddin BA, Vlassiss AG, Elghazouli AY, Nethercot DA.** Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss – Part I: simplified assessment framework. *Engineering structures.* 2008; 30: 1308-1318. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.07.011.
 - [9] **Li Z.-X, Zhong B, Shi Y, Ding Y, Hao Y.** A computationally efficient numerical model for progressive collapse analysis of reinforced concrete structures. *International journal of protective structures.* 2019; 10(3): 330-358. DOI: 10.1177/2041419619854768.
 - [10] **Naji A.** Comparison of column removal methods in progressive collapse analysis of reinforced concrete moment-resisting frames. *Practice periodical on structural design and construction.* 2019; 24(4): 10 p. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000435.
 - [11] **Yang F, Yang J.** Analysis on the dynamic responses of the broken conductors in transmission lines. *Applied mechanics and materials.* 2011; 50-51: 511-515. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.50-51.511.
 - [12] **Zhang Z, Lin Y, Li H.** Wind-induced progressive collapsed performance of cut-type transmission tower-line system. *Applied mechanics and materials.* 2013; 353-356: 2392-2396. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.353-356.2392.
 - [13] **Chen W, Ye J, Li X.** Thermal behavior of gypsum-sheathed cold-formed steel composite assemblies under fire conditions. *Journal of constructional steel research.* 2018; 149: 165-179.
 - [14] **Tong L, Li S, Xiong J.** Material parameter modeling and solution technique using birth-death element for notched metallic panel repaired with bonded composite patch. *Chinese journal of aeronautics.* 2014; 27(2): 445-452. DOI: 10.1016/j.cja.2013.07.031.
 - [15] **Xu P, Zheng JY, Liu PF.** Finite element analysis of burst pressure of composite hydrogen storage vessels. *Materials and design.* 2009; 30: 2295-2301. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.03.006.
 - [16] **Zheng J.** Improved nonlinear analysis method and application of construction mechanics for steel structures. *Journal of engineering research.* 2018; 6(3): 16-33.
 - [17] **Patel Mukund R.** *Wind and Solar Power Systems.* L.; N. Y.; Washington, D. C.: CRC Press, 1999. 348 p.
 - [18] **Hastings NA., Peacock JB.** *Statistical distributions: a handbook for students and practitioners.* N.Y, Wiley, 1975. 130 p.
-

About the authors

Sergey Vladimirovich Doronin (b. 1963) graduated from the Krasnoyarsk Institute of Non-Ferrous Metals named after M.I. Kalinin (KICM) in 1985, PhD (1994). Leading Researcher of the Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies. He is a co-author of about 200 scientific articles and abstracts in the field of applied mechanics and computational modeling. Author ID (RSCI): 116272; Author ID (Scopus): 57193348323; Researcher ID (WoS): V-5470-2017. SDoronin@ict.nsc.ru. ✉

Yulia Fedorovna Filippova (b. 1987) graduated from the Siberian Federal University (SFU) in 2010, PhD (2020). Researcher at the Laboratory of Computational Mechanics and Risk Analysis of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies. He is a co-author of about 30 works. Author ID (RSCI): 633598; Author ID (Scopus): 57193351701. Researcher ID (WoS): A-9919-2014. FilippovaJF@ict.nsc.ru.

Received April 04, 2025. Revised May 26, 2025. Accepted June 12, 2025.
