

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.047.2

DOI 10.52684/2312-3702-2022-42-3-5-10

АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ОТВЕТСТВЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ И СКЛОННОСТИ К ЛАВИНООБРАЗНОМУ РАЗРУШЕНИЮ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. Ф. Мущанов, А. Н. Орзеховский

Мущанов Владимир Филиппович, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, Российская Федерация, тел. +7-949-357-78-09; e-mail: mvf@donnasa.ru;

Орзеховский Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка, Донецкая Народная Республика, Российская Федерация, тел. +7-949-409-74-94; e-mail: a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru

В статье анализируются основные тренды в области обеспечения устойчивости несущих строительных конструкций к лавинообразному разрушению. Анализируются действующие нормативные документы. Отмечаются спорные моменты в методике назначения элемента, удаление которого может вызвать лавинообразное разрушение конструкции. Предложен алгоритм определения наиболее ответственного элемента или группы наиболее ответственных элементов системы, случайные параметры которых и будут определять надежность всей конструкции в целом. Данная методика реализована с использованием метода конечных элементов в геометрически и конструктивно нелинейной постановке. Приведены поправочные функции для локальной матрицы жесткости стержневого элемента, используемые в геометрически нелинейном расчете. Данный алгоритм реализован на программном языке MATLAB. Описан пример использования предложенной методики на структурном покрытии типа МАРХИ с размерами в плане 24×24 метра и ячейкой в виде пентаэдра (высота 3 метра).

Ключевые слова: *несущие металлические конструкции, прогрессирующее обрушение, метод конечных элементов, геометрическая и конструктивная нелинейность, вероятность отказа, надежность.*

ANALYSIS OF THE DEGREE OF RESPONSIBILITY OF THE ELEMENTS TO DETERMINE THE CHARACTERISTICS OF RELIABILITY AND THE INCLINATION TO AN AVALANCHE DESTRUCTION OF ROD STRUCTURES

V. F. Mushchanov, A. N. Orzhehovskiy

Mushchanov Vladimir Filippovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, Donetsk People's Republic, Russian Federation, phone: +7-949-357-78-09; e-mail: mvf@donnasa.ru;

Orzhehovskiy Anatoliy Nikolayevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, Donetsk People's Republic, Russian Federation, phone: +7-949-409-74-94; e-mail: a.n.orzhehovskiy@donnasa.ru

The article analyzes the main trends in the field of ensuring the stability of load-bearing building structures to avalanche destruction. The current regulatory documents are analyzed. There are gaps in the normative literature in the method of assigning an element, the removal of which can cause an avalanche-like destruction of the structure. An algorithm for determining the most critical element or group of system elements is proposed. Their reliability characteristics will determine the reliability of the entire system as a whole. The given technique is implemented using the finite element method in a geometrically and structurally nonlinear formulation. The correction functions for the local stiffness matrix of the rod element, which are used in the geometrically nonlinear calculation, are considered. This algorithm is implemented in the MATLAB programming language. An example of using the proposed technique on a structural coating of the MARKHI type with plan dimensions of 24×24 meters and a cell in the form of a pentahedron (3 meters high) is given.

Keywords: *load-bearing metal structures, progressive collapse, finite element method, geometric and structural non-linearity, failure probability, reliability.*

В современном строительстве большое внимание уделяется вопросам обеспечения надежности проектируемых и уже эксплуатируемых зданий и сооружений. Явным признаком

продвижения в этом направлении стали разработки нормативных документов нового поколения, а также их редакции [1, 2]. Но, несмотря на положительную динамику развития нормотворчества, отказы конструкций, в том числе высокого уровня ответственности, продолжают иметь место в практике строительства. Анализируя данные случаи, можно сделать вывод о том, что подавляющее большинство их происходит по типу прогрессирующего или лавинообразного разрушения. Работы по предотвращению аварий такого типа постоянно осуществляются научными организациями страны. На сегодняшний день итогом этой работы можно назвать нормативный документ СП 385.1325800.2018. В нем разъясняется как производить расчет на склонность конструкции к лавинообразному разрушению, для каких конструкций требуется его осуществлять, какие необходимо выполнить условия, чтобы этого не делать. Приводятся конструктивные решения по усилению несущего каркаса, даны общие рекомендации для недопустимости развития лавинообразного разрушения [3]. Следует отметить, что введение подобного документа требовалось давно. Разработки аналогичных нормы в ближнем и дальнем зарубежье проводились значительно раньше [4, 5]. При всей необходимости и важности СП 385.1325800.2018 для современной строительной отрасли в нем присутствует ряд спорных моментов. Документ устанавливает необходимость расчета конструкций классов КС-2 и КС-3 на склонность к лавинообразному разрушению. Однако необходимость данного расчета для класса КС-2 является спорной и вызывает ряд вопросов, связанных с экономикой [6, 7, 8, 9]. Настораживает также сама методика его проведения. Требуется определить элемент, удаление которого из конструкции может спровоцировать лавинообразное обрушение, смоделировать его отказ и определить повлечет ли это разрушение оставшейся части конструкции. В документе присутствуют рекомендации по выбору таких элементов, но ориентированы они в первую очередь на классические рамные системы. Если конструкция много раз статически неопределима и не имеет наиболее ответственного элемента (например, пространственного каркаса ангара, выполненного из решетчатых арок), то задача значительно усложняется или вообще становится неразрешимой. Обратной стороной данной проблемы может быть простая статически определимая расчетная схема, где удаление любого элемента приводит к обрушению всей системы. В любом случае, решение по выбору наиболее ответственного элемента ложится на плечи проектировщика и нет какой-либо четкой однозначной методики для его определения.

Авторами предлагается методика решения данной проблемы. Следует отметить, что предложенный алгоритм определения наиболее ответственного элемента или группы элементов применим к конкретному нагружению конструкции, и

разработанный алгоритм расчета должен реализовываться для всех нагружений в рамках анализируемых расчетных ситуаций. В соответствии с требованиями нормативных документов, определение системы выполняется в геометрически и конструктивно нелинейной постановке. Для учета геометрической нелинейности используется пошаговое приложение нагрузки в сочетании с простыми итерациями. Заданная нагрузка прикладывается пошагово (шаг нагружения – 1/10...1/50 от конечного значения воздействия). После каждого этапа догружения производится расчет напряженно-деформированного состояния системы. При этом учитываются перемещения и усилия, полученные конструкцией на предыдущем шаге нагружения, а роль геометрической матрицы жесткости элемента конструкции играют поправочные функции, приведенные в описании ниже и на рисунке 1. Поскольку для анализа напряженно-деформированного состояния используется метод конечных элементов, то накапливаемые перемещения узлов и напряжения в элементах конструкции возможно учитывать путем корректировки локальных матриц жесткости (рис.1). Данную операцию можно осуществить с помощью функций, полученных на основе работ Н.В. Корноухова и В.В. Новожилова [10, 11] (рис. 2).

$\frac{EA}{L}$					$-\frac{EA}{L}$				
	$\frac{12EI_z}{L^3}$				$\frac{6EI_z}{L^2}$	$\frac{12EI_z}{L^3}$			$\frac{6EI_z}{L^2}$
		$\frac{12EI_y}{L^3}$		$\frac{6EI_y}{L^2}$			$\frac{12EI_y}{L^3}$		$\frac{6EI_y}{L^2}$
			$\frac{GI_{\varphi\varphi}}{L}$					$-\frac{GI_{\varphi\varphi}}{L}$	
				$\frac{4EI_y}{L}$			$\frac{6EI_y}{L^2}$		$\frac{2EI_y}{L}$
					$\frac{4EI_z}{L}$		$\frac{6EI_z}{L^2}$		$\frac{2EI_z}{L}$
						$\frac{EA}{L}$			
							$\frac{12EI_z}{L^3}$		$\frac{6EI_z}{L^2}$
								$\frac{12EI_y}{L^3}$	$\frac{6EI_y}{L^2}$
									$\frac{GI_{\varphi\varphi}}{L}$
									$\frac{4EI_y}{L}$
									$\frac{4EI_z}{L}$
									$\frac{4EI_z}{L}$

Рис. 1. Матрица жесткости пространственного стержневого элемента в локальной системе координат: EA – продольная жесткость, EI_y, EI_z – изгибные жесткости, GI_{φφ} – жесткость при кручении, L – проектная длина стержня

Функции, приведенные в таблице, зависят от направления продольного усилия в элементе. Применение гиперболических операторов в поправочных выражениях позволяет значительно ускорить вычислительный процесс. Учет конструктивной нелинейности осуществляется за счет удаления из первичной расчетной схемы элементов, несущая способность которых оказывается исчерпанной в ходе пошагового нагружения конструкции внешней дополнительной нагрузкой. Для полученной таким образом вторичной расчетной схемы анализируется напряженно-

деформированное состояние в целом и несущая способность оставшихся элементов в частности. Если перераспределившиеся усилия вызывают отказ еще каких-либо частей системы, а усилия вновь вышедших элементов опять влекут отказы, то считается, что происходит лавинообразное разрушение. Таким образом, элемент конструкции, вышедший из работы первым, является ключевым и имеет наивысшую степень ответственности, последующие – меньше.

s5e					s5e				
	s1e			s2e		s1e			s2e
		sz1e		sz2e			sz1e		sz2e
				sz3e			sz2e		sz4e
				s3e		s2e			s4e
					s5e				
						s1e			s2e
							sz1e		sz2e
									sz3e
									s3e

Рис. 2. Матрица корректирующих функций

Таблица

Корректирующие функции

Растянутые стержни	Сжатые стержни
$s1e = \frac{\phi^3 \cdot \sin(h)}{12 \cdot rt}$;	$s1e = \frac{\phi^3 \cdot \sin(\phi)}{12 \cdot rc}$;
$s2e = \frac{\phi^2 \cdot (\cos(h) - 1)}{6 \cdot rt}$;	$s2e = \frac{\phi^2 \cdot (1 - \cos(\phi))}{6 \cdot rc}$;
$s3e = \frac{\phi \cdot (\phi \cdot \cos(h) - \sin(h))}{4 \cdot rt}$;	$s3e = \frac{\phi \cdot (\sin(\phi) - \phi \cdot \cos(\phi))}{4 \cdot rc}$;
$s4e = \frac{\phi \cdot (\sin(h) - \phi)}{2 \cdot rt}$;	$s4e = \frac{\phi \cdot (\phi - \sin(\phi))}{2 \cdot rc}$;
$s5e = \frac{1}{1 - \frac{EF \cdot rtm}{4 \cdot \rho axl^3 \cdot l^2}}$;	$s5e = \frac{1}{1 + \frac{EF \cdot rcn}{4 \cdot (-\rho axl)^3 \cdot l^2}}$;
$\rho axl = \frac{N_{кон} - N_{нач}}{2}$; $\phi = \sqrt{\frac{ \rho axl }{EI}} \cdot l$; $rt = 2 - 2 \cdot \cos(h) + \phi \cdot \sin(h)$; где N – продольное усилие в стержне; EI – жесткость при изгибе в рассматриваемой плоскости.	

В некоторых случаях, когда оставшаяся часть конструкции воспринимает внешнюю нагрузку и перераспределившиеся усилия исключенных элементов после выхода из работы одного или группы их, может наступить стабилизация процесса. В этом случае продолжается пошаговый процесс догружения, и чем больше таких этапов стабилизации, тем система более устойчива к прогрессирующему разрушению. Опираясь на работы Н. С. Стрелецкого [12], можно отметить, что несущая способность растянутого стержня после наступления предела текучести исчерпана не полностью. Остается 30–50 %, приходящиеся на зону упрочнения диаграммы растяжения стали. Поэтому после выхода из строя растянутого элемента просто удалить его из расчетной схемы нельзя. Так как он продолжает работать в зоне пластических деформаций и ограничивает перемещения узлов прикрепления к конструкции. В таких случаях в узлы прикладываются внутренние усилия, действующие в удаленном элементе, но с противоположным знаком. Сжатые элементы просто исключаются из расчетной схемы, так как их остаточная несущая способность после потери устойчивости составляет 3 %. Блок-схема описанной методики

приведена на рисунке 3. Определенный таким образом наиболее ответственный элемент системы и будет тем опасным звеном, разрушение которого может повлечь развитие лавинообразного разрушения конструкции. Его вероятность отказа будет определять надежность всей системы в целом (нижнюю границу надежности). Если в процессе расчета наблюдаются этапы стабилизации конструкции, то вероятность отказа первой группы элементов, вышедших из работы до стабилизации, можно назвать верхней границей надежности. Реальные характеристики надежности будут находиться между верхним и нижним пределами.

Рассмотрим пример использования предложенной методики на структурной конструкции типа МАРХИ с размерами 24 × 24 × 3 м на жестком контуре с узлами крепления по верхнему поясу (рис. 4). На конструкцию действует снеговая нагрузка [13] и собственный вес. Шаг приращения нагрузки – 0,5 кН. Жесткости элементов подобраны исходя из требований прочности. По итогам расчета определены 40 стержней вышедшие из работы на втором шаге догружения, после превышения значений нагрузки «собственный вес+снег» (рис. 5). Анализируя рисунок 5,

можно отметить явную склонность системы к прогрессирующему обрушению. Для решения этой проблемы увеличим сечения отмеченных стержней на одну позицию сортамента труб, используемых в МАРХИ, и повторим расчет. После двух этапов пересчета конструкции с увеличения сечений получаем два стержня нижнего

пояса вылетающих из работы на 6 шаге догружения (рис. 6). Порядок выхода элементов из работы приведен в виде гистограммы (рис. 7). Наблюдается два этапа стабилизации системы. На шестом шаге (после вылета двух стержней) и седьмом (после вылета 26 элементов). Далее начинается прогрессирующее обрушение.

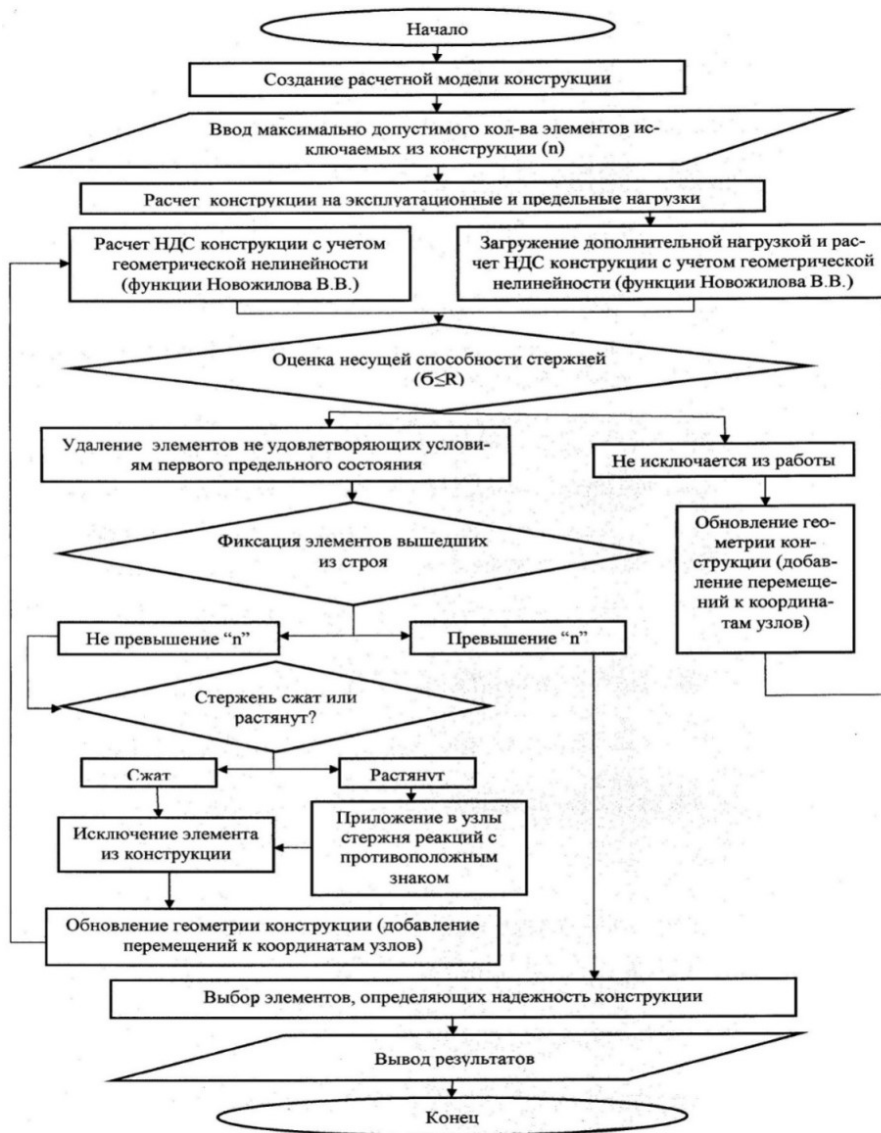


Рис. 3. Блок-схема определения наиболее ответственных элементов конструкции

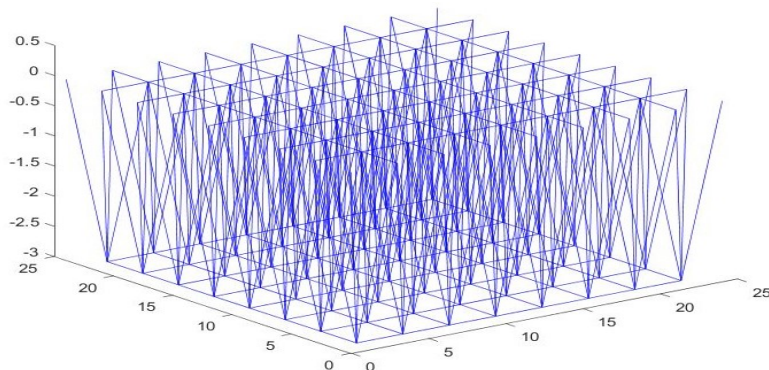


Рис. 4. Первичная расчетная схема структурной конструкции 24 × 24 × 3 м

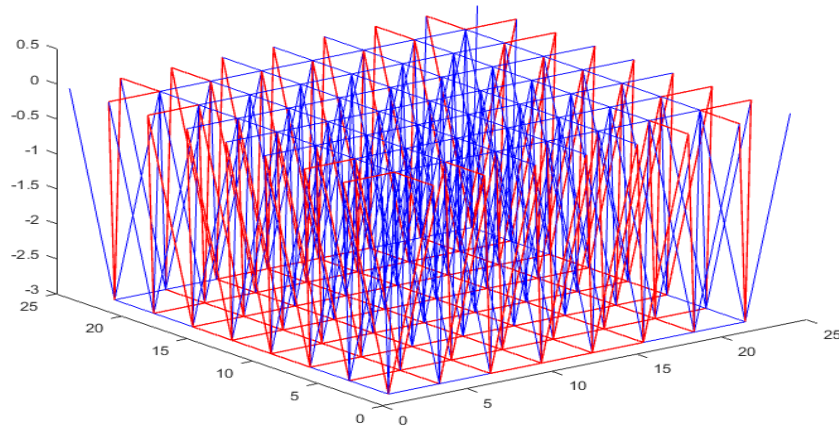


Рис. 5. Стержни, вышедшие из работы на втором шаге догрузки первого расчета

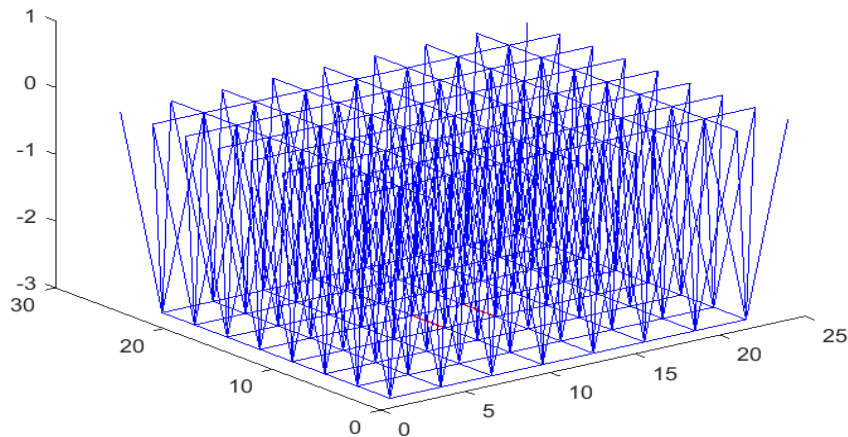


Рис. 6. Стержни, вышедшие из работы на шестом шаге догрузки третьего расчета

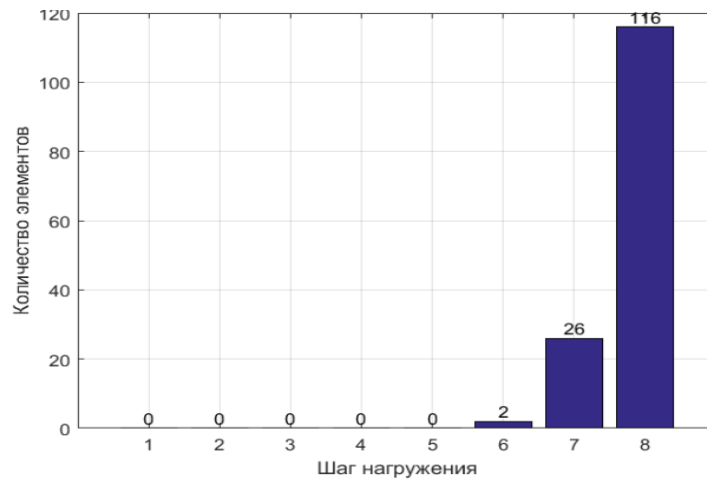


Рис. 7. График выхода элементов конструкции на каждом шаге догрузки третьего расчета

Заключение

Авторами выполнен анализ нормативной литературы на предмет защиты конструкций от лавинообразного обрушения. Отмечены отдельные вопросы, требующие уточнения и проведения дополнительных исследований.

Предложена методика, основанная на геометрически и конструктивно нелинейном анализе напряженно-деформированного состояния системы, позволяющая определять один или группу наиболее ответственных элементов

конструкции, разрушение которых может инициировать прогрессирующее обрушение. Характеристики надежности этих элементов будут определять надежность конструкции в целом.

Предложенная методика апробирована на структурном покрытии системы МАРХИ с размерами $24 \times 24 \times 3$ метра. При этом базовая конструкция (запроектированная исходя из условий прочности) оказалась склонной к лавинообразному разрушению, а используя авторскую методику, удалось снизить вероятность развития прогрессирующего обрушения и значительно

сuzить группу наиболее ответственных элементов конструкции (с 40 до двух стержней).

Используя разработанный подход, процедуры вычисления характеристик надежности много-

кратно статически неопределимых стержневых систем можно перевести в практическую плоскость инженерных расчетов.

Список литературы

1. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования. Основные положения. – Введен 2014–11–14, изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 14 с.
2. ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности. – Введен 2016–11–28, изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 62 с.
3. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. – Введен 2018–07–05, изд. официальное. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 24 с.
4. UFC 4-023-03. Design of buildings to resist progressive collapse. – 14 July 2009. – Change 3, 1 November 2016.
5. GSA Alternate Path Analysis and Design Guidelines for Progressive Collapse Resistance. – October 24, 2013. – Revision 1, January 28, 2016.
6. Анализ нормативных требований к расчету строительных конструкций на прогрессирующее обрушение / И.И. Ведяков, П.Г. Еремеев, П.Д. Одесский и др. // Вестник НИЦ «Строительство». – 2019. – №2 (21). – С. 15–29. – Режим доступа: <https://vestnik.cstroy.ru/jour/article/view/18/18>, свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
7. Рекунов С. С. Расчет многоэтажного здания на прогрессирующее обрушение при сейсмическом воздействии / С. С. Рекунов, А. Ю. Косова, С. Ю. Иванов, И. С. Завьялов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 3 (36). – С. 15–20.
8. Лепешкина Д.О. Прогрессирующее обрушение в областях высокой сейсмической активности с применением PushoverAnalysis / Д.О. Лепешкина // Alfabuild. – 2017. – № 2(2). – С. 45–48.
9. Расчет строительных конструкций на прогрессирующее обрушение: нормативные требования / И. И. Ведяков, П. Г. Еремеев, П. Д. Одесский и др. // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 4. – С. 16–24. – DOI 10.33622/0869-7019.2019.04.16-24.
10. Корноухов Н.В. Прочность и устойчивость стержневых систем. Упругие рамы, фермы и комбинированные системы / Н.В. Корноухов. – Москва : Москва, 1949. – 376 с.
11. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. Современные проблемы механики / В.В. Новожилов; под общ. ред. А.И. Лурье и Л.Г. Лойцянского. – Ленинград – Москва: ОГИЗ Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1948. – 214 с.
12. Стрелецкий Н. С. Избранные труды / сост. : Е. И. Беленя, Н. Н. Стрелецкий, Н. П. Мельников и др. ; под общ. ред. Е.И. Беленя.–Москва :Стройиздат, 1975. – 422 с.
13. Лебедева И.В. Экспериментальные исследования для установления расчетных параметров снеговых нагрузок /И. В. Лебедева, А. В. Маслов, М. М. Березин // Вестник НИЦ «Строительство». – 2020. – № 25(2). – С. 66–76. – Режим доступа: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2\(25\)-66-76](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-2(25)-66-76), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.

© В. Ф. Муцанов, А. Н. Оржеховский

Ссылка для цитирования:

Муцанов В. Ф., Оржеховский А. Н. Анализ степени ответственности элементов для определения характеристик надежности и склонности к лавинообразному разрушению стержневых конструкций // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 4 (42). С. 5–10.

УДК 624.071.22:531.62

DOI 10.52684/2312-3702-2022-42-4-10-15

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНЫХ НАГРУЗОК ДЛЯ ГИБКИХ НИТЕЙ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

Д. А. Тарасов

Тарасов Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и управление», Пензенский государственный технологический университет, г. Пенза, Российская Федерация; e-mail: den517375@ya.ru

Рассмотрена одна из основных проблем, возникающих при обследовании зданий и инженерных сооружений, связанная с определением несущей способности разного рода конструкций. Поставлена задача по оценке предельных нагрузок способных воспринимать конструктивными элементами, исходя из требований прочности и жесткости на изменившиеся условия эксплуатации с учетом реальных свойств материала. В качестве объекта исследования рассматриваются элементы, обеспечивающие общую прочность покрытий общественных зданий и инженерных сооружений, расчетной моделью которых является гибкая нить.