

Т.А. МАЦЕЕВИЧ<sup>1,2</sup>, О.Г. ШКАРПОВА<sup>1</sup>, С.Г. САИЯН<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН), г. Москва, Россия

## УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

**Аннотация.** Землетрясения вызывают горизонтальные и вертикальные ускорения земной поверхности, что может привести к повороту и изгибу конструкций. Колонны, как элементы строительных конструкций, подвержены воздействию сейсмических сил, что может вызывать их кручение. Также при землетрясениях одной из наиболее серьезных угроз для зданий и сооружений является возможность возникновения пожаров. Поэтому вопросы исследования устойчивости сжатых металлических элементов с кручением при температурном воздействии являются весьма важными для сейсмических районов. В работе получены методики аналитического и численного расчета для определения устойчивости сжатых металлических элементов с кручением при температурном воздействии.

Расчетный анализ проводится на основе методов численного моделирования в программном комплексе ANSYS Mechanical. В качестве испытуемой конструкции разработана модель стальной колонны из двутавра, выполненной из стали С355. Для проведения теплового расчета использовался модуль "Transient Thermal" посредством приложения к обогреваемым поверхностям температурного нагружения, изменяющегося по времени. Нагрев колонны производится по стандартной температурной кривой газовой среды в условиях пожара. Для выполнения аналитического расчета разработаны программы для расчетов в ПК Matlab. Алгоритм аналитического расчета потери устойчивости сжатого элемента при температурном воздействии основан на определении коэффициента снижения модуля упругости и температуры нагрева, соответствующие подобранному промежуточному значению температурного коэффициента снижения предела текучести.

Приведены сравнительные графики изменения критической температуры от действия нагрузки при численном и аналитическом расчете и диаграммы понижения критической силы при температурном воздействии.

Разработаны методики численного и аналитического расчета устойчивости сжатого элемента с кручением при огневом воздействии в ПК Ansys и Matlab.

**Ключевые слова:** Устойчивость стальных элементов, критическая сила, критическая температура, температурное воздействие, численное моделирование, сейсмическое воздействие, кручение.

T.A. MATSEEVICH<sup>1,2</sup>, O.G. SHKARPOVA<sup>1</sup>, S.G. SAIYAN<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, 119526, Moscow, Russia

## STABILITY OF COMPRESSED METAL ELEMENTS UNDER COMBINED TEMPERATURE AND SEISMIC EFFECTS

**Abstract.** Earthquakes cause horizontal and vertical accelerations of the earth's surface, which can lead to the rotation and bending of structures. Columns, as elements of building structures, are subject to seismic forces, which can cause them to twist.

© Мацеевич Т.А., Шкарпова О.Г., Саиян С.Г., 2024

*Additionally, one of the most serious threats to buildings and structures during earthquakes is the possibility of fires. Therefore, the issues of studying the stability of compressed metal elements with torsion under temperature effects are very important for seismic regions. The study presents methodologies for analytical and numerical calculations to determine the stability of compressed steel elements and compressed steel elements with torsion under temperature effects.*

*The calculation analysis is carried out based on numerical simulation methods in the software complex ANSYS Mechanical. A model of a steel column made of S355 steel, designed as a double T-beam, was developed as the test construction. A "Transient Thermal" module type was used for conducting the thermal analysis by applying temperature loading those changes over time to the heated surfaces. The heating of the column is performed according to the standard temperature curve of the gas environment in fire conditions. For analytical calculations, programs were developed for calculations in the PC Matlab. The algorithm for analytically calculating the loss of stability of a compressed element under temperature effects is based on determining the coefficient of reduction of the modulus of elasticity and the heating temperature corresponding to the selected intermediate value of the temperature coefficient of reduced yield strength.*

*Comparative graphs showing the change in critical temperature due to load action in numerical and analytical calculations, as well as diagrams depicting the decrease in critical force under temperature effects, are provided.*

*Methodologies for numerical and analytical calculations of the stability of a compressed element with torsion under fire exposure in ANSYS and Matlab have been developed.*

**Keywords:** *Transient Thermal, Eigenvalue Buckling, Stability of steel elements, critical force, critical temperature, torsion, temperature effect, seismic effect, numerical simulation.*

## 1. Введение

При землетрясении часто наблюдаются разрушения, вызванные потерей устойчивости колонн. Эти разрушения могут проявляться в виде наклонных трещин в угловых несущих элементах зданий. Кручение в колоннах при землетрясениях является одним из типов деформаций, которые могут происходить со зданиями и сооружениями в результате сейсмической активности.

Одной из наиболее серьезных угроз для зданий и сооружений при землетрясениях является возможность возникновения пожаров. Были проведены исследования воздействия на здания сейсмических нагрузок как после, так и до пожара [1-7].

Таким образом, вопросы устойчивости сжатых металлических элементов с кручением при температурном воздействии являются весьма актуальными для сейсмических районов.

В исследованиях [8-11] решены задачи по устойчивости и критической работе стержней в упругой среде. Обнаружено, что при большой длине стержня после потери устойчивости дальнейшие его деформации происходят даже при силе меньше критической, т.е. происходит явление хлопка.

В [12] проведено исследование устойчивости стальных сжатых элементов конструкций, проанализированы экспериментальные данные о работе этих элементов и теоретические разработки относительно их расчетов, построены графики коэффициентов продольного изгиба и предложены формулы для определения этих коэффициентов в зависимости от прочности стали. В [13] собраны и проанализированы исследования, связанные с поведением стальных конструкций в условиях сжимающей нагрузки. Выявлены важные аспекты, связанных с эксплуатационными характеристиками стальных конструкций при сжатии: влияние свойств материала, конструктивных конфигураций, условий нагружения и геометрических параметров на поведение стальных конструкций. Также были освещены проблемы и возможности оптимизации прочности, устойчивости и безопасности стальных конструкций при сжимающих нагрузках.

В исследовании [14] изучалось влияние скорости нагружения на прочность и устойчивость сжатых металлических конструкций. Показано, что скорость нагружения оказывает значительное влияние на прочность и устойчивость сжатых металлических

конструкций. Было обнаружено, что более высокие скорости нагружения приводят к увеличению концентрации напряжений, более быстрой деформации и потенциально ускоренному разрушению конструкций.

Обзорная работа [15] была сосредоточена на экспериментальном и численном исследовании прочности и устойчивости скрученных сжатых металлических конструкций. Было подчеркнуто влияние скручивания на реакцию конструкции, характер деформации и механизмы разрушения металлических конструкций, подвергнутых сжатию.

В работе [16] изучалось влияние кручения на прочность и устойчивость сжатых металлических конструкций при различных условиях нагружения. Исследование [17] показало экспериментальные исследования поведения при изгибе и кручении в сжатых металлических конструкциях.

В работе [18] привели результаты экспериментального исследования огнестойкости сжатых стальных конструкций при кручении. Эксперименты показали, что на огнестойкость сжатых стальных конструкций с кручением влияют несколько факторов, включая геометрию конструкции, свойства материала стали и распределение температуры во время пожара. В исследовании подчеркивалось значительное влияние крутильных воздействий на поведение таких конструкций в условиях пожара.

В исследовании [19] проведен численный анализ для изучения устойчивости сжатых металлических конструкций в условиях пожара. Основное внимание было уделено пониманию того, как сжатые металлические конструкции ведут себя при воздействии огня и факторов, влияющих на их устойчивость. С помощью численного анализа исследователи смогли изучить структурную реакцию сжатых металлических конструкций в условиях пожара. Они учитывали такие параметры, как свойства материала, геометрия конструкции и характеристики огнестойкости, чтобы оценить устойчивость конструкций.

В работе [20] авторы исследовали огнестойкость стальных конструкций при одновременном воздействии осевого сжатия и кручения. Целью было изучить, как стальные конструкции реагируют на условия пожара при одновременном воздействии сжатия и кручения. Авторы проанализировали влияние осевого сжатия и кручения на структурную целостность и огнестойкость стальных компонентов.

В работе [21] изучили влияние кручения на огнестойкость сжатых стальных конструкций. В ходе экспериментальных исследований и численного анализа авторы изучили поведение сжатых стальных конструкций, подверженных воздействию крутящих сил при воздействии огня, оценили реакцию конструкции, виды разрушения и огнестойкость стальных компонентов при комбинированных нагрузках.

В данной работе разрабатывается методика численного моделирования для определения устойчивости сжатых стальных элементов при нагреве и учета деформированного состояния сжатых элементов и сжатых с кручением элементов при пожаре.

## **2. Модели и методы**

Рассматривается стальная колонна из двутавра высотой 4 м, выполненная из стали С355 (рисунок 1). Основные характеристики сечения представлены в таблице 1.

Нагрев балки производится согласно стандартной температурной кривой. Для исследования прочности и устойчивости сжатых металлических элементов при температурных воздействиях за исходные данные были взяты экспериментальные данные механических свойств основных строительных сталей при повышенных температурах (таблица 2).

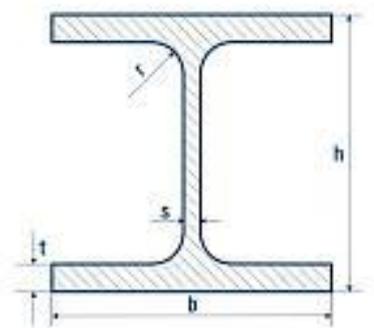


Рисунок 1 – Сечение исследуемой стальной колонны

Таблица 1 – Основные характеристики сечения

Высота h, мм	Ширина b, мм	Толщина полки t, мм	Толщина стенки s, мм	площадь сечения A, см <sup>2</sup>	Минимальный момент инерции I <sub>min</sub> , см <sup>4</sup>	Максимальный момент инерции I <sub>max</sub> , см <sup>4</sup>	Минимальный радиус инерции i <sub>min</sub> , см
160	160	8	13	54.25	889.4	2492	8

Таблица 2 – Температурные коэффициенты снижения механических свойств строительных сталей

Температура нагрева, °С	Температурный коэффициент снижения предела текучести, $\gamma_t$	Температурный коэффициент снижения модуля упругости, $\gamma_e$
Стали повышенной прочности С355		
250	1	1
300	0.96	0.84
350	0.92	0.75
400	0.88	0.7
450	0.85	0.65
500	0.81	0.6
550	0.75	0.55
600	0.66	0.46
650	0.53	0.34
700	0.35	0.18

### Аналитический расчет температурного коэффициента

*Аналитический расчет температурного коэффициента при центральном сжатии*

Температурный коэффициент снижения прочности стали с учетом устойчивости элементов сплошного сечения при центральном сжатии силой N по формуле

$$\gamma_t = \frac{N}{AR_{yn}\gamma_{ct}\gamma_c\varphi_y} \quad , \quad (1)$$

где, коэффициент условий работы  $\gamma_c = 1$ , коэффициент условий работы особого предельного состояния  $\gamma_{ct} = 1$ , модуль упругости  $E = 20600 \text{ кН/см}^2$ , предел текучести  $R_{yn} = 35.5 \text{ кН/см}^2$ ,  $\varphi_u$  – коэффициент устойчивости при центральном сжатии, значение которого при  $\bar{\lambda} \geq 0,6$  следует определять по п. 7.1.3 СП 16.13330.

Аналитический расчет температурного коэффициента при изгибе в плоскости стенки, совпадающей с плоскостью симметрии сечения. Температурный коэффициент снижения прочности стали с учетом устойчивости элементов сплошного сечения при изгибе в плоскости стенки, совпадающей с плоскостью симметрии сечения по формуле

$$\gamma_t = \frac{M}{W\gamma_{ct}\gamma_c\varphi_b}, \quad (2)$$

где,  $\varphi_b$  – коэффициент устойчивости при изгибе, определяемый по приложению Ж СП 16.13330 для балок с опорными сечениями, закрепленными от боковых смещений и поворота.

*Численная реализация конечно-элементной модели при температурных и силовых воздействиях*

Для задач линейной статики решается следующая система линейных алгебраических уравнений:

$$[K^u] \cdot \{u\} = \{F\}, \quad (3)$$

где,  $\{u\}$  – вектор узловых перемещений,  $[K^u]$  – глобальная механическая матрица жесткости, определяемая как:

$$[K^u] = \sum_{e=1}^N [K_e^u], \quad (4)$$

где,  $N$  – количество элементов,  $[K_e^u]$  – элементная матрица механической жесткости.

Для стационарных задач теплопроводности система линейных алгебраических уравнений (3) решается заменой:

глобальной матрицы  $[K^u] \rightarrow$  матрицей теплопроводности  $[K^t]$ ;

вектора узловых перемещений  $\{u\} \rightarrow$  вектором узловых температур  $\{T\}$ ;

вектора внешней узловой нагрузки  $\{F\} \rightarrow$  вектором теплового потока  $\{Q\}$ .

В матричном уравнении (3) для термомеханической слабосвязанной задачи добавим зависимость глобальной матрицы  $[K^u]$  и вектора внешней узловой нагрузки  $\{F\}$  от вектора узловых температур  $\{T\}$ , а также матрицу теплопроводности  $[K^t]$  и вектора теплового потока  $\{Q\}$  [22]:

$$\begin{bmatrix} [K^u(\{u\}, \{T\})] & [0] \\ [0] & [K^t(\{u\}, \{T\})] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F(\{u\}, \{T\})\} \\ \{Q(\{u\}, \{T\})\} \end{Bmatrix}, \quad (5)$$

Данная задача решается в односвязной формулировке, таким образом, в уравнении теплопроводности будут отсутствовать члены, содержащие деформацию. Тогда термомеханическая задача в общем виде запишется как

$$\begin{bmatrix} [K^u(\{u\}, \{T\})] & [0] \\ [0] & [K^t(\{T\})] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{T\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F(\{u\}, \{T\})\} \\ \{Q(\{T\})\} \end{Bmatrix}, \quad (6)$$

Учитывая несвязность задачи теплопроводности с механическими деформациями, следствием которой является отсутствие во второй строке матричного уравнения (3) зависимости от вектора перемещений  $\{u\}$ , данную задачу сводится к дальнейшей последовательной передаче температурных полей в прочностную задачу с учетом зависимости механической матрицы жесткости и глобального вектора нагрузок от температуры в физическом законе.

*Алгоритм аналитического расчета потери устойчивости сжатого элемента при огневом воздействии*

К основным задачам алгоритма аналитического расчета относится:

1. Расчет температурного коэффициента снижения прочности стали с учетом устойчивости элементов сплошного сечения.

2. Подбор интерполированием промежуточного значения температурного коэффициента снижения предела текучести на основе имеющегося дискретного набора известных значений.

3. Определение коэффициента снижения модуля упругости и температуры нагрева, соответствующие подобранному промежуточному значению температурного коэффициента снижения предела текучести.

Для выполнения аналитического расчета были разработаны программы в ПК Matlab.

### 3. Результаты исследования и их анализ

#### Моделирование потери устойчивости

Численное исследование проводится для сжатого стержня двутаврового сечения длиной 4 метра с жестким и шарнирным закреплением.

Для моделирования была построена конечно-элементная модель (рисунок 2 слева). Стержень разбит на 8 элементов (минимальный размер элемента - 0.5 м).

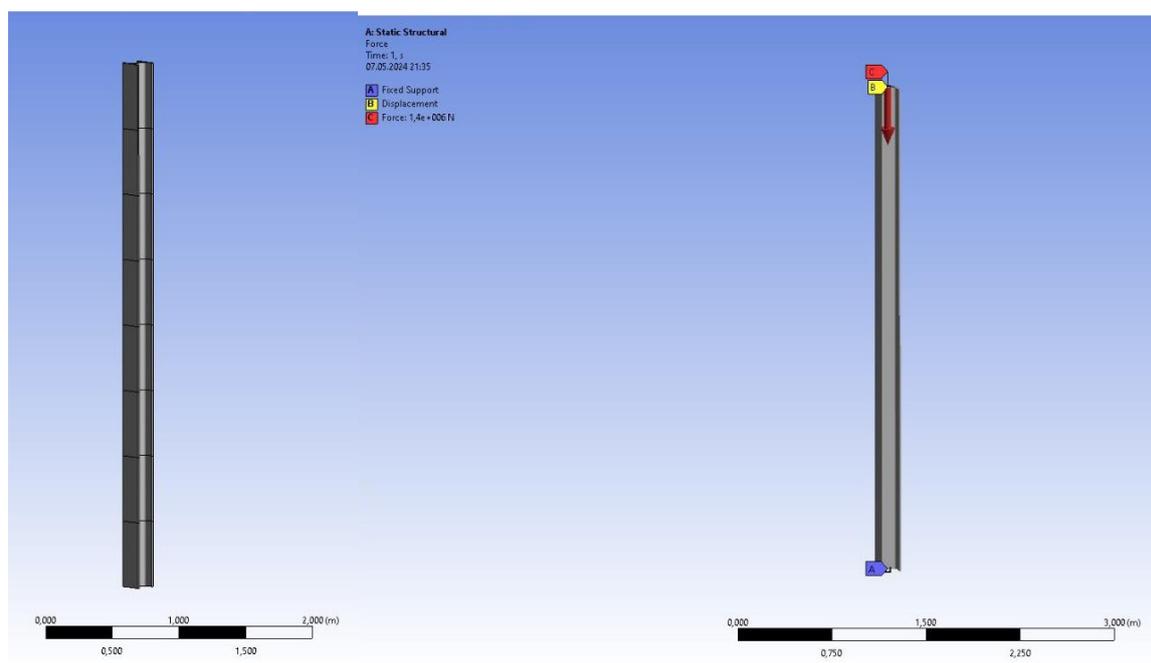


Рисунок 2 – Конечно-элементная модель с указанными граничными условиями

Для корректного задания жесткого опирания необходимо ограничить все перемещения нижней грани колонны, для шарнирного – разрешить перемещения верхней грани по направлению оси стержня (по оси Z), и зафиксировать от линейных перемещений вдоль оси X и Y. Также к верхней грани была приложена продольная сила  $F = 1400$  кН (рисунок 2 справа).

Методика численного моделирования линейной потери устойчивости в ПК ANSYS Mechanical сводится к последовательному статическому анализу конструкции (в модуле «Static Structural»), где были назначены необходимые граничные условия и нагрузки, которые будут использованы в дальнейшем расчете в модуле «Eigenvalue Buckling» (рисунок 3).



Рисунок 3 – Структура реализации нелинейного анализа потери устойчивости в ПКAnsys

Первые формы колебаний и значений коэффициентов устойчивости, полученные в добавленном модуле «Eigenvalue Buckling» представлены на рисунке 4.

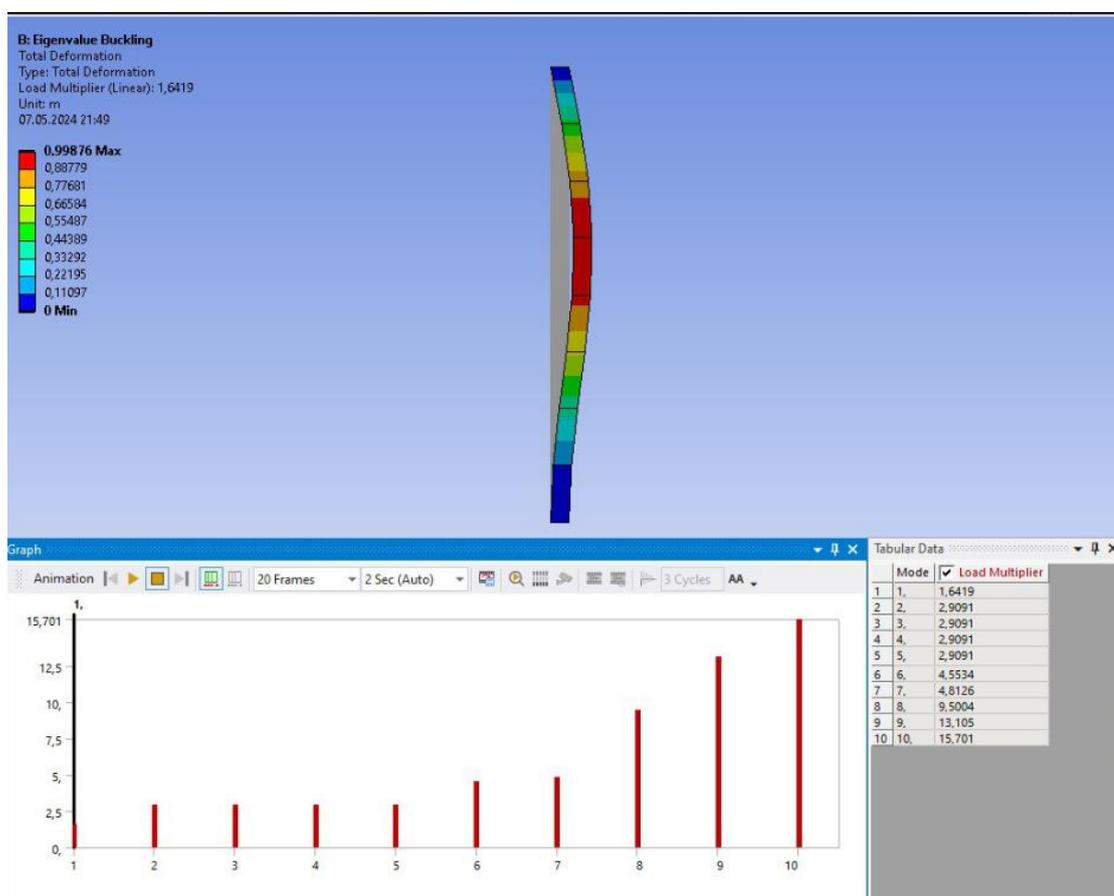


Рисунок 4 – Первая форма потери устойчивости

Для определения критического значения нагрузки необходимо значение приложенной нагрузки умножить на мультипликатор нагрузки, который позволяет увеличивать нагрузки на конструкцию до критического значения. Таким образом, критическое значение силы для первой формы потери устойчивости определяем по формуле

$$F_{kr} = F \cdot Load Multiplier \quad (7)$$

$$F_{kr} = 1400 \cdot 1.6419 = 2298.66 \text{ кН}$$

Для проверки достоверности расчетов проведем верификацию численного решения в сравнении с аналитическими методами. Расчет значения критической силы выполняется по формуле Эйлера для нахождения критической нагрузки, используемый для стальных стержней гибкостью  $\lambda \geq 100$ :

$$F_{kr} = \frac{E * I_{min} * \pi^2}{(\mu l)^2} \quad (8)$$

где  $\mu = 0.7$  – коэффициент приведения заданной длины стержня к длине полуволны. Вычислим значение критической силы:

$$F_{kr} = \frac{20600 * 889.4 * 3.14^2}{(0.7 * 400)^2} = 2306 \text{ кН.}$$

Полученная при моделировании критическая сила несколько меньше, вычисленной аналитически. Относительная разница результатов моделирования и аналитических данных составляет 0,32%.

Используя форму потери устойчивости, полученную из линейного анализа, создаем начальное несовершенство в нелинейном анализе, чтобы учесть особенности конструкции и определить ее чувствительность к потере устойчивости.

Нагрузка для нелинейного расчета прикладывалась немного больше, чем было определено из линейного расчета потери устойчивости. Это связано с тем, что в расчете нелинейной потери устойчивости будет возникать лавинообразный рост деформаций, который приводит к большим перемещениям без увеличения нагрузки, что будет свидетельствовать о потере несущей способности. В данной задаче заведем большую нагрузку равнялась 4000 кН, была учтена физическая и геометрическая нелинейности. Для нелинейного расчета величина приложенной на текущем шаге расчета нагрузки была привязана к псевдовремени, что для времени  $t = 1$  с соответствует величина нагрузки  $F = 4000$  кН.

Для физически нелинейного расчета взаимосвязь между напряжениями и деформациями можно задать разными способами, в данном случае используется билинейная диаграмма деформирования материала (диаграмма Прандтля), показанная на рисунке 5.

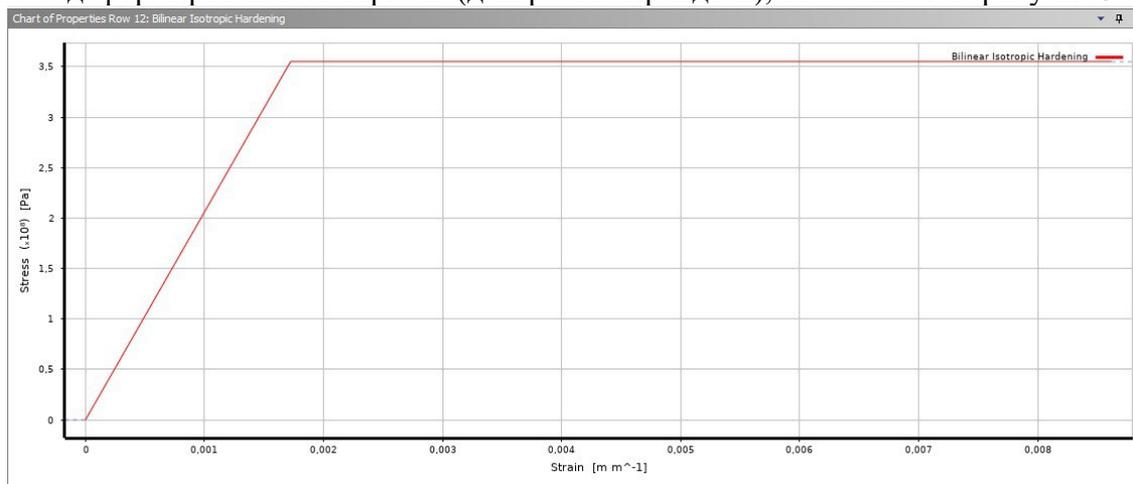


Рисунок 5 – Билинейная диаграмма деформирования материала (Диаграмма Прандтля)

Стержень был рассчитан с учетом начальных несовершенств (на основе первой формы потери устойчивости). На рисунке 6 представлены результаты расчета нелинейной потери устойчивости. Для линейного анализа коэффициент критической нагрузки равен 0,5746 при

величине приложенной нагрузки 4000 кН. Для нелинейного анализа, при учете добавления начального несовершенства, лавинообразный рост деформаций и перемещений начинается с коэффициента 0,4737, что соответствует критической силе при нелинейном расчете 1920 кН.

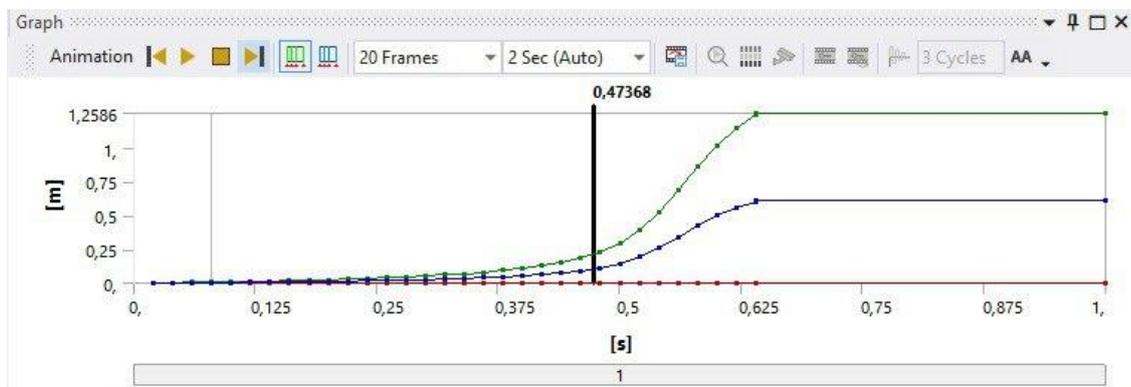


Рисунок 6 – График зависимости перемещений от времени (величины силы)

При исследовании устойчивости сжатого стержня при кручении к сжатому стержню был приложен крутящий момент относительно оси Z, равный 300 кН·м. Коэффициент потери устойчивости показан на рисунке 7.

	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Load Multiplier
1	1.	1.6283
2	2.	2.9091

Рисунок 7 – Коэффициент запаса устойчивости сжатого стержня с учетом кручения

Можно заметить, что коэффициент потери устойчивости сжатого стержня с учетом кручения, относительно сжатого стержня уменьшился на 0,83%

Зная коэффициент потери устойчивости сжатого и сжато с кручением стержней, вычислим критический крутящий момент:

$$\begin{aligned}
 F_{kr} &= 1400 \cdot 1.6419 = 2298.66 \text{ кН} \\
 F_{kr} + M_{kr} &= (F + M) \cdot \text{Load Multiplier} \\
 2298.66 + M_{kr} &= (1400 + 300) \cdot 1.6283 \\
 M_{kr} &= 469.45 \text{ кН} \cdot \text{м}
 \end{aligned}$$

### Моделирование прогрева сжатого элемента

Рассмотрим процесс прогрева элемента во времени до достижения им критической температуры и сравним полученный результат с потерей устойчивости при нормальных температурных условиях.

Нагрев колонны производился согласно стандартной температурной кривой газовой среды в условиях пожара согласно формуле (9), которому соответствует рисунок 8.

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1), \quad (9)$$

где:  $T_0$  – температура при нормальных условиях, 22 °С,  $t$  – физическое время.

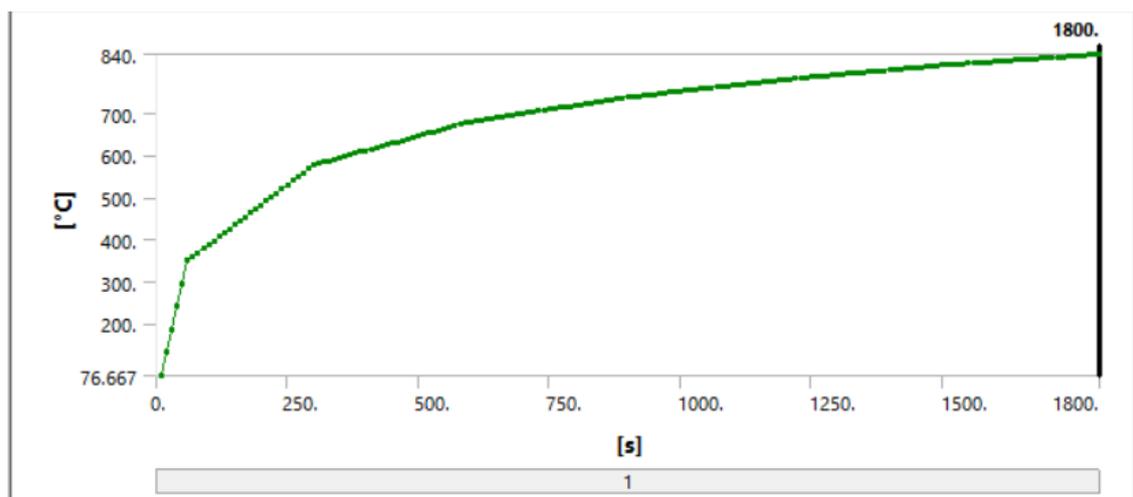


Рисунок 8 – График зависимости температуры от времени

Численное моделирование производилось в следующем порядке:

1. При времени  $t$  от 0 до 100 секунд прикладывается нагрузка (силовое воздействие) при температуре стержня  $T = 22^{\circ}\text{C}$ .
2. Начиная с физического времени  $t = 100$  секунд, начинается прогрев конструкции по температурной кривой  $T(t)$ , определенной по формуле (9), показанной на рисунке 8.

На рисунке 9 можно проанализировать процесс изменения перемещений во времени.

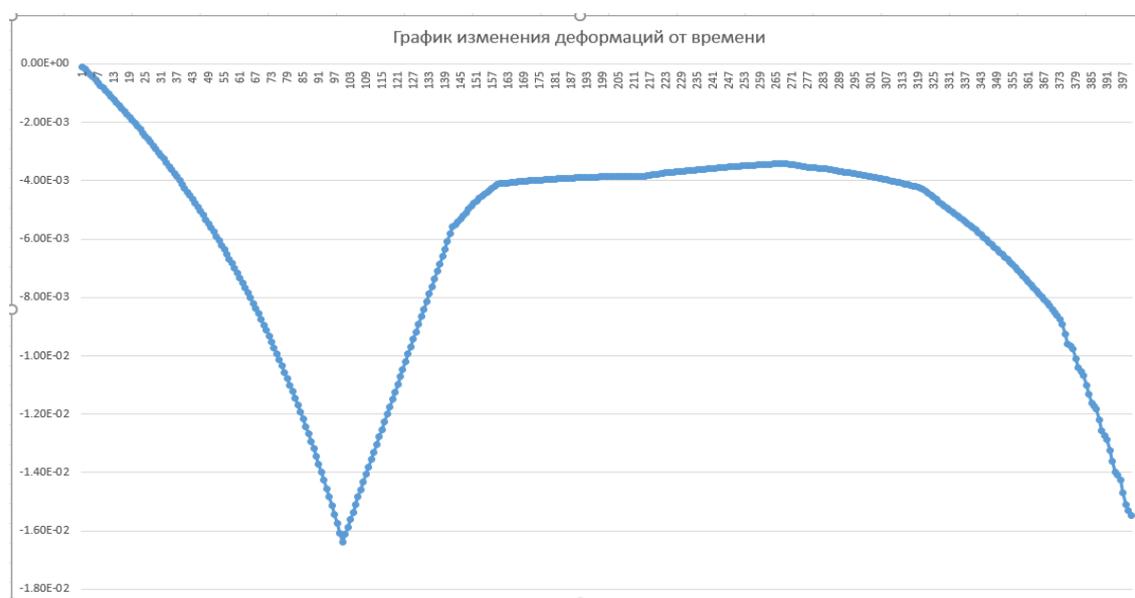
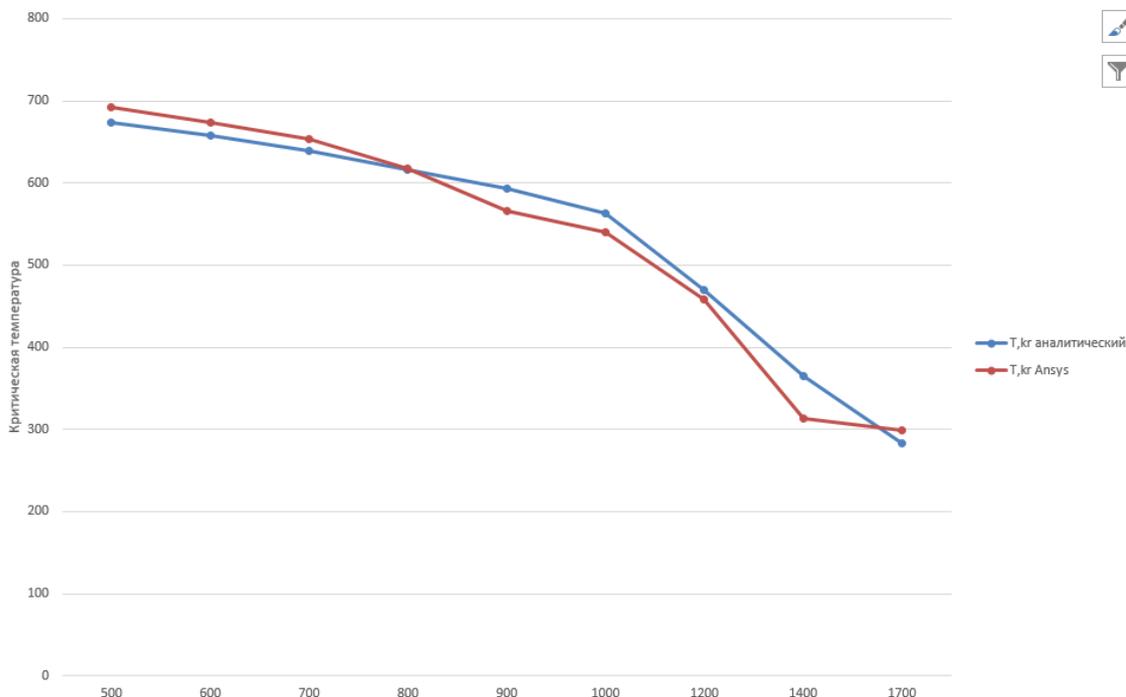


Рисунок 9 – График изменения перемещений во времени

График на рисунке 9 можно разделить на 3 участка. Участок  $t = 0$  до 100 секунд происходит увеличение деформаций от воздействия силового сжатия, далее на втором участке происходит уменьшение перемещений за счет увеличения температуры (нагрева), а далее происходит деградация физико-механических свойств под воздействием высокой температуры и перемещения начинают лавинообразно увеличиваться, начиная с которого ведется отсчет начала нелинейной потери устойчивости.

Однако по этому графику мы можем проанализировать только за какое время наступит достижение потери устойчивости. Чтобы определить критическую температуру нагрева,

необходимо провести анализ температурной кривой. Таким образом, после приложения различных нагрузок, можно увидеть зависимость критической температуры от приложенных нагрузок, показанный на рисунке 10.



**Рисунок 10 – График изменения критической температуры от величины сжатия**

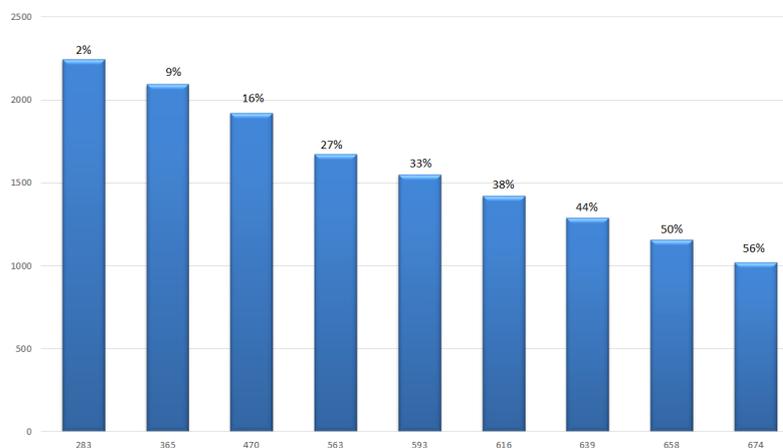
Зная график изменения модуля упругости при нагревании, можно определить и изменение критических сил. Значения критической силы при нагревании приведены в таблице 3.

**Таблица 3 – Таблица понижения критической силы при нагревании**

$T_{kr}$ аналитический, °C	283	365	470	563	593	616	639	658	674
$P_{kr}$ , кН	2245	2094	1923	1672	1551	1422	1291	1158	1021

Диаграмма понижения критической силы при нагревании представлена на рисунке 11.

*Диаграмма понижения критической силы при нагревании*



**Рисунок 11 – Диаграмма понижения критической силы при нагревании**

### Моделирование прогрева сжатого элемента при кручении

Фиксируя сжимающую нагрузку и меняя только крутящий момент (50 кН·м, 80 кН·м, 100 кН·м), получаем зависимость критической температуры от приложенной нагрузки при кручении элемента, представленную на рисунке 12.

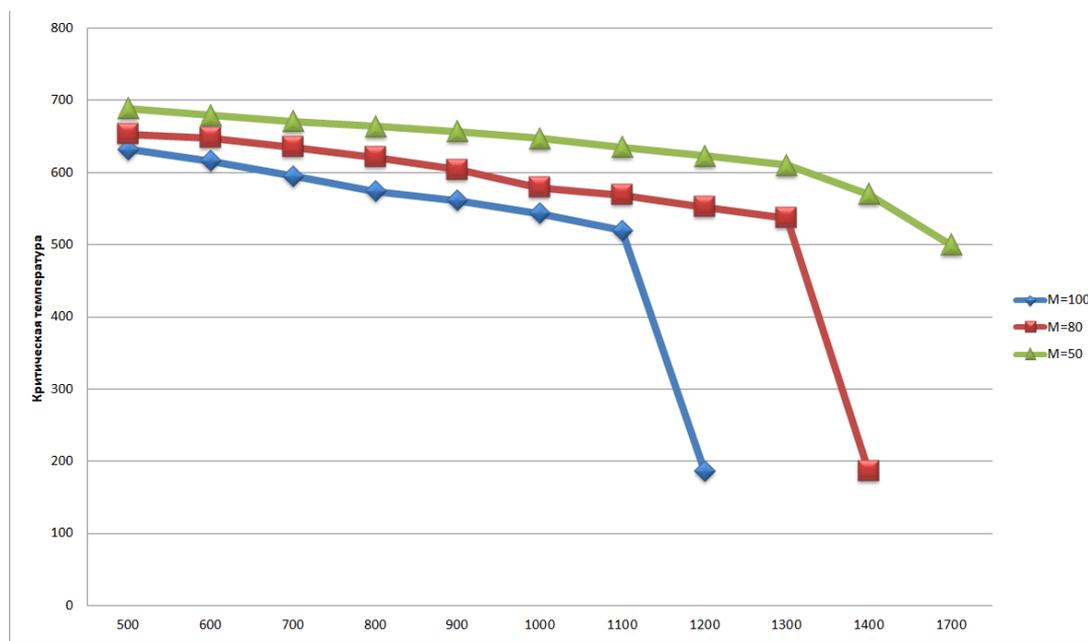


Рисунок 12 – График изменения критической температуры от приложенной нагрузки при кручении элемента

Хорошо видно, что критическая температура при кручении моментом 50 кН·м понижается при увеличении нагрузки и имеет свое минимальное значение при  $T = 500$  °С, при достижении 1700 кН. При кручении моментом 80 кН·м критическая температура постепенно понижается до 550 °С при увеличении нагрузки до 1350 кН, а потом резко падает до 200 °С, достигая значения нагрузки в 1400 кН. Аналогичный результат и при кручении моментом 100 кН·м. Здесь критическая температура постепенно понижается до 500 °С при увеличении нагрузки до 1150 кН, а потом резко падает до 200 °С, достигая значения нагрузки в 1200 кН.

#### 4. Выводы

1. Разработаны методики аналитического и численного расчета потери устойчивости сжатых и сжатых с кручением элементов при температурном воздействии в ПК Ansys и Matlab.
2. При проведении численного моделирования сжатия стального элемента из двутавра была получена критическая сила несколько меньше, вычисленной аналитически. Значение относительной разницы составили менее 1%, из чего можем сделать вывод о хорошей сходимости полученных численных результатов.
3. При проведении моделирования сжатого с кручением стального элемента из двутавра коэффициент потери устойчивости относительно сжатого стержня уменьшился на 0,8%.
4. При проведении аналитического расчета стержня при действии сжатия с кручением критическая сила при нагревании до 269 °С уменьшилась на 1%, при 529 °С уменьшилась на 22%.

#### Благодарности

Работа (МТА, СГС) выполнена за счет гранта РФФ № 24-49-02002.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. No. 475-476. Pp. 1563-1566.
2. Li L.-Z. et al. Experimental study on seismic performance of post-fire reinforced concrete frame // *Engineering Structures*. – 2019. No. 179. pp. 161-173. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.080
3. Tamrazyan A., Matseevich T. The Criteria for Assessing the Safety of Buildings with a Reinforced Concrete Frame during an Earthquake after a Fire // *Buildings*. – 2022, No. 12 (10), 1662, DOI:10.3390/buildings12101662
4. Avetisyan L.A., Chapidze O.D. Estimation of reinforced concrete seismic resistance bearing systems exposed to fire // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. No.456. pp.1-6. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012035
5. Mazza F., Imbrogno G. Effects of Fire Duration on the Seismic Retrofitting with Hysteretic Damped Braces of R.C. School Buildings // *Front. Built Environ*. – 2019. No. 5. pp. 1-15. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00141
6. Shein A. I., Zaitsev M. B., Tamrazyan A. G. and Matseevich T. A. Damping of seismic vibrations of towers using a controlled reactive dampener//*Journal of Structural Engineering*. 2023. Vol. 50, No. 3. Pp. 177-183
7. Khachiyan E.Y. On determining of the ultimate strain of Earth crust rocks by the value of relative slips on the earth surface after a large earthquake // *Earth Sci*. 2016. V. 5, Iss.6. P. 111–118.
8. Каюмов Р. А. Закрытое поведение сжатых стержней в упругой среде // *Известия РАН. Механика деформируемого твердого тела*. – 2017. – №5. – С. 122–129.
9. Areiza-Hurtado M., Aristizábal-Ochoa J. D. Second-order analysis of a beam-column on elastic foundation partially restrained axially with initial deflections and semirigid connections // *Structures*. – 2019. – V. 20. – P. 134–146.
10. Carvajal-Munoz J. S., Vega-Posada C. A., Saldarriaga-Molina J. C. Analysis of beamcolumn elements on non-homogeneous soil using the differential transformation method. // *Revista Facultad de Ingenieria*. – 2022. – № 103. – Pp. 67–76.
11. Yayli M. Ö. Buckling analysis of Euler columns embedded in an elastic medium with general elastic boundary conditions // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. – 2018. – №46. – Pp. 110–122.
12. Кондель В. Н., Шевченко Ю.О., Лобода Д.А. Анализ коэффициентов продольного изгиба с учетом прочности стали // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*. – 2016. – № 72. – С. 118–123.
13. Chen J., et al. Performance of Steel Structures under Compression: A Review of Recent Research // *Structural Engineering Review*. – 2020. – V. 32(1). – Pp. 45–58.
14. Li G., et al. Effect of Loading Rate on the Strength and Stability of Compressed Metal Structures // *Journal of Construction Materials*. 2017. 14(2). Pp. 87-100.
15. Wang Q., et al. Experimental and Numerical Study on the Strength and Stability of Twisted Compressed Metal Structures // *Journal of Structural Engineering*. 2020. 28(2). Pp. 134-147.
16. Zhang H., et al. Effects of Torsion on the Strength and Stability of Compressed Metal Structures under Various Loading Conditions // *Structural Mechanics*. 2018. 16(4). Pp. 275-289.
17. Chen Y., et al. Experimental Investigation of Buckling and Torsional Behavior in Compressed Metal Structures // *Structural Stability Research*. 2016. 8(1). Pp. 45-58.
18. Smith J., et al. Experimental investigation of the fire resistance of compressed steel structures with torsion // *Journal of Fire Safety Engineering*. 2020. 15(2). Pp. 87-99.
19. Brown A., et al. Numerical analysis of the stability of compressed metal structures under fire conditions // *Fire Safety Journal*. 2019. 25(4). Pp. 321-335.
20. White L., et al. Fire performance of steel structures subjected to combined axial compression and torsion // *Structural Fire Engineering*. 2018. 12(1). Pp. 56-68.
21. Johnson M., et al. Effects of torsion on the fire resistance of compressed steel structures // *International Journal of Structural Engineering*. 2017. 22(3). Pp. 189-202.
22. Saiyan S. G., Paushkin A. G. Development and verification of the two-layer thick-walled spherical shell's finite element model under temperature and force exposure // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2020. 913. 032058. DOI 10.1088/1757-899X/913/3/032058.

**REFERENCES**

1. Tamrazyan A. Reduce the impact of dynamic strength of concrete under fire conditions on bearing capacity of reinforced concrete columns. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. No. 475-476. Pp. 1563-1566.
2. Li L.-Z. et al. Experimental study on seismic performance of post-fire reinforced concrete frame. *Engineering Structures*. 2019. No. 179. Pp. 161-173. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.080
3. Tamrazyan A., Matseevich T. The Criteria for Assessing the Safety of Buildings with a Reinforced Concrete Frame during an Earthquake after a Fire. *Buildings*. 2022. No. 12 (10), 1662, DOI:10.3390/buildings12101662

4. Avetisyan L.A., Chapidze O.D. Estimation of reinforced concrete seismic resistance bearing systems exposed to fire. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. No.456. pp.1-6. DOI:10.1088/1757-899X/456/1/012035
5. Mazza F., Imbrogno G. Effects of Fire Duration on the Seismic Retrofitting with Hysteretic Damped Braces of R.C. School Buildings. *Front. Built Environ.* – 2019. No. 5. pp. 1-15. DOI: 10.3389/fbuil.2019.00141
6. Shein A. I., Zaitsev M. B., Tamrazyan A. G. and Matseevich T. A. Damping of seismic vibrations of towers using a controlled reactive dampener. *Journal of Structural Engineering*. 2023. Vol. 50, No. 3. Pp. 177-183
7. Khachiyan E.Y. On determining of the ultimate strain of Earth crust rocks by the value of relative slips on the earth surface after a large earthquake. *Earth Sci*. 2016. Vol. 5, Iss.6. Pp. 111–118.
8. Kayumov R. A. Critical behavior of compressed rods in an elastic medium // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. *Solid State*. - 2017. - №5. - p. 122-129.
9. Areiza-Hurtado M., Aristizábal-Ochoa J. D. Second-order analysis of a beam-column on elastic foundation partially restrained axially with initial deflections and semirigid connections. *Structures*. – 2019. – V. 20. – P. 134–146.
10. Carvajal-Munoz J. S., Vega-Posada C. A., Saldarriaga-Molina J. C. Analysis of beamcolumn elements on non-homogeneous soil using the differential transformation method. *Revista Facultad de Ingenieria*. – 2022. – № 103. – P. 67–76.
11. Yayli M. Ö. Buckling analysis of Euler columns embedded in an elastic medium with general elastic boundary conditions. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2018. No. 46. Pp. 110–122.
12. Kondel V. N. Analysis of the longitudinal bending coefficients taking into account the steel strength. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Road University. Automobile and Road University*. - 2016. – No. 72. - Pp. 118-123.
13. Chen J., et al. Performance of Steel Structures under Compression: A Review of Recent Research. *Structural Engineering Review*. – 2020. – Vol. 32(1). – Pp. 45–58.
14. Li G., et al. Effect of Loading Rate on the Strength and Stability of Compressed Metal Structures. *Journal of Construction Materials*. 2017. 14(2). Pp. 87-100.
15. Wang Q., et al. Experimental and Numerical Study on the Strength and Stability of Twisted Compressed Metal Structures. *Journal of Structural Engineering*. 2020. 28(2). Pp. 134-147.
16. Zhang H., et al. Effects of Torsion on the Strength and Stability of Compressed Metal Structures under Various Loading Conditions. *Structural Mechanics*. 2018. 16(4). Pp. 275-289.
17. Chen Y., et al. Experimental Investigation of Buckling and Torsional Behavior in Compressed Metal Structures. *Structural Stability Research*. 2016. 8(1). Pp. 45-58.
18. Smith J., et al. Experimental investigation of the fire resistance of compressed steel structures with torsion. *Journal of Fire Safety Engineering*. 2020. 15(2). Pp. 87-99.
19. Brown A., et al. Numerical analysis of the stability of compressed metal structures under fire conditions. *Fire Safety Journal*. 2019. 25(4). Pp. 321-335.
20. White L., et al. Fire performance of steel structures subjected to combined axial compression and torsion. *Structural Fire Engineering*. 2018. 12(1). Pp. 56-68.
21. Johnson M., et al. Effects of torsion on the fire resistance of compressed steel structures // International Journal of Structural Engineering. 2017. 22(3). Pp. 189-202.
22. Saiyan S. G., Paushkin A. G. Development and verification of the two-layer thick-walled spherical shell's finite element model under temperature and force exposure. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2020. 913. 032058. DOI 10.1088/1757-899X/913/3/032058

#### Информация об авторах

##### **Мацевич Татьяна Анатольевна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия,

доктор физико-математических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций, Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва, Россия,

Ведущий научный сотрудник

E-mail: [MatseevichTA@mgsu.ru](mailto:MatseevichTA@mgsu.ru)

##### **Шкарпова Ольга Геннадьевна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия,

магистр.

E-mail: [olya.shkarpova@yandex.ru](mailto:olya.shkarpova@yandex.ru)

**Саиян Сергей Гургенович**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
(НИУ МГСУ), Москва, Россия,  
аспирант кафедры сопротивления материалов  
Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия,  
Младший научный сотрудник  
E-mail: Berformert@gmail.com

**Information about authors**

**Tatyana A. Matseevich**

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Reinforced Concrete  
and Stone Structures,  
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,  
Leading Researcher  
E-mail: MatseevichTA@mgsu.ru

**Olga G. Shkarpova**

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia.  
Master's graduate.  
E-mail: olya.shkarpova@yandex.ru

**Sergey G. Saiyan**

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia.  
postgraduate student of the Department of Resistance of Materials.  
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,  
Junior Researcher  
E-mail: Berformert@gmail.com