УДК 624.012.45
2.1.9. Строительная механика



А.С. Тощакова
Вологодский государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОТКАЗА СТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПО КРИТЕРИЮ УСТОЙЧИВОСТИ

В статье представлен вероятностный подход к оценке вероятности потери устойчивости внецентренно-сжатой стальной колонны сечением 35К2, работающей в условиях огневого воздействия. Нагрев учитывается через снижение расчетного сопротивления стали. На основе метода Монте-Карло оценивается влияние случайного разброса механических характеристик стали и геометрических параметров на несущую способность колонны по критерию устойчивости. Предложенный подход позволяет количественно оценить надежность элемента, определить наиболее значимые факторы риска и обосновать необходимые допуски или конструктивные меры для обеспечения требуемой безопасности.

Вероятность отказа, устойчивость, огневое воздействие, стальной стержень, случайные величины, программный комплекс, вероятностное проектирование, стальные конструкции, безопасность, анализ данных.

Надежность строительных конструкций, особенно несущих элементов, таких как колонны, является краеугольным камнем обеспечения безопасности зданий и сооружений. Современные нормы проектирования [1, 2] базируются на детерминированных подходах с использованием частных коэффициентов надежности. Однако эти подходы не всегда в полной мере учитывают свойственную случайность исходных параметров: механических свойств материалов, точности изготовления и монтажа, реальных условий эксплуатации. Особую актуальность приобретает учет случайных факторов при оценке поведения конструкций в экстремальных условиях, например при пожаре или длительном огневом воздействии, когда ключевые характеристики материалов – прочность и модуль упругости – существенно снижаются.

Вероятностные методы, в частности метод Монте-Карло, являются мощным инструментом для анализа надежности, позволяющим напрямую оценить вероятность отказа элемента при совместном влиянии множества случайных параметров [3, 4]. Они находят все более широкое применение в обосновании расчетных характеристик и уровня надежности ответственных конструкций [5, 6].

Данная работа посвящена исследованию вероятности потери устойчивости стальной внецентренно-сжатой колонны сечением двутавр 35К2 (марка стали С345) с учетом случайного разброса прочностных и упругих характеристик стали, а также геометрических параметров. Колонна рассматривается как элемент с жесткой заделкой в фундаменте, подверженный усилию N=125,99 кН и изгибающему моменту M=496,57 кН·м, в условиях, моделирующих снижение несущей способности при пожаре. Влияние нагрева моделируется через детерминированное снижение расчетного сопротивления стали.

Основное условие обеспечения несущей способности по устойчивости для внецентренно-сжатого элемента имеет вид [2]:

$$N/(\varphi A R_y \gamma_c)+M/(W_x R_y \gamma_c) \le 1, \quad (1)$$

где N – расчетное продольное усилие (125,99 кН);

M – расчетный изгибающий момент (496,57 кН·м);

φ – коэффициент устойчивости при центральном сжатии, зависящий от гибкости стержня λ, кривой устойчивости и расчетного сопротивления стали;

A – площадь поперечного сечения двутавра 35К2;

W_x – момент сопротивления сечения относительно оси X;

R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести;

γ_c – коэффициент условий работы (принят равным 1,0).

Для учета огневого воздействия вводится коэффициент снижения расчетного сопротивления $k_{red}(T)$, зависящий от температуры стали. Для оценочного расчета примем, что нагрев приводит к снижению R_y на 30 % (аналогичное снижение происходит и с модулем упругости, что влияет на гибкость и коэффициент φ). Таким образом, в расчетах используется значение $R_y^{eff}=0.7\cdot R_y^{20}$, где R_y^{20} – сопротивление при нормальной температуре.

На основе анализа литературы [3, 7, 8] и нормативной документации назначены законы распределения и параметры для ключевых случайных величин, влияющих на условие (1). Данные представлены в таблице.

Таблица

Статистические параметры величин в вероятностной модели

Параметр	*Обозначение*	*Распределение*	*Параметры распределения*	*Обоснование/примечание*
Расч. сопротивление стали (20 °C)	R_y^{20}	Нормальное	Среднее: 345 МПа Ст. отклонение: 17,25 МПа (CoV≈5 %)	Марка С345. CoV 5 % типичен для предела текучести [7, 8].
Модуль упругости стали	E	Нормальное	Среднее: $2{,}06\cdot10^5$ МПа Ст. отклонение: $6{,}18\cdot10^3$ МПа (CoV≈3 %)	[3, 8]. Влияет на гибкость и коэффициент φ.
Площадь сечения	A	Равномерное	$[A_{nom} - 2\ \%, A_{nom} + 2\ \%]$	Допуски на прокат по ГОСТ 8239-89. A_{nom} для 35К2 – 173,87 см².
Момент сопротивления	W_x	Равномерное	$[W_{nom} - 2\ \%, W_{nom} + 3\ \%]$	Допуски на прокат. W_{xnom} для 35К2 – 2302,6 см³.
Коэф. условий работы	γ_c	Детерминированный	1,0	Для упрощения модели принят постоянным.

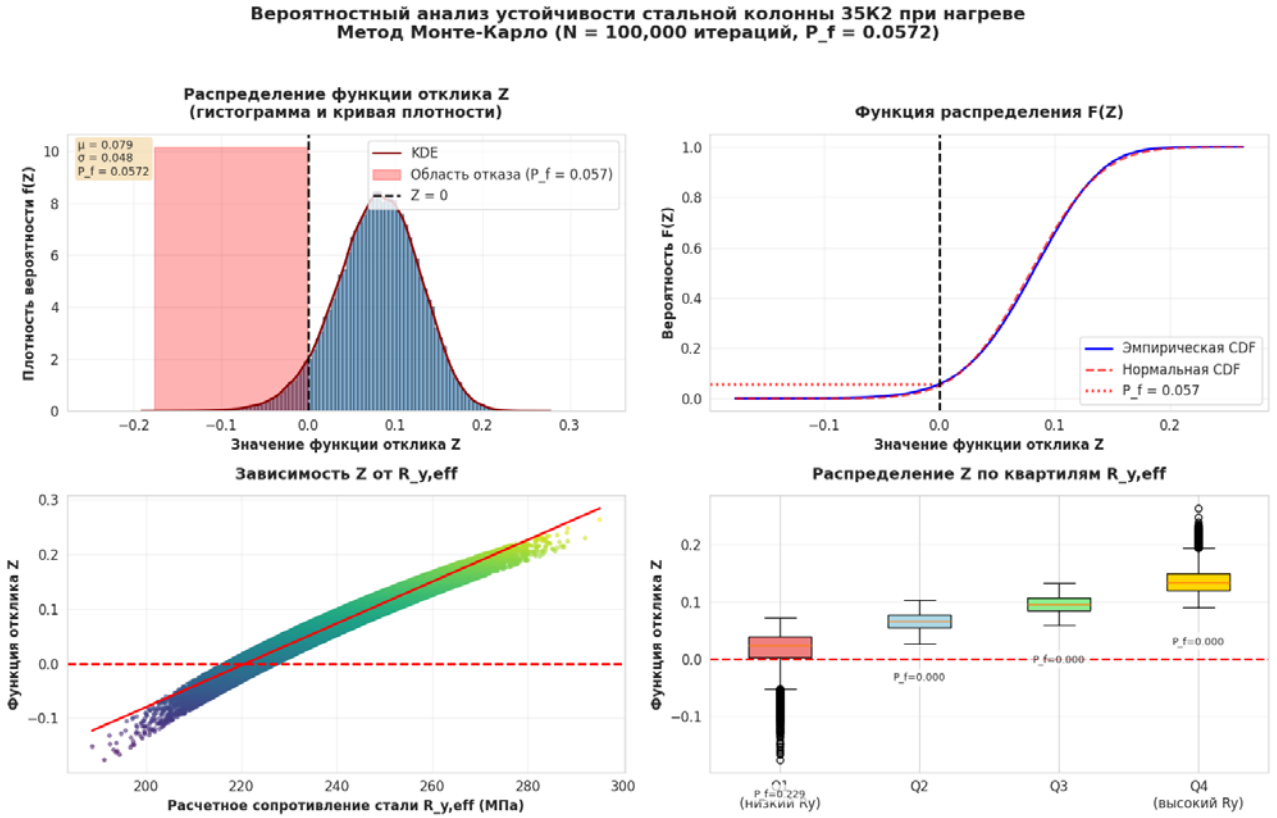


Рис. Результаты вероятностного анализа устойчивости стальной колонны 35К2 при огневом воздействии методом Монте-Карло (N = 100 000 итераций)

Расчетное сопротивление с учетом нагрева: $R_y=0{,}7\cdot R_y^{20}$. Коэффициент устойчивости φ определяется в соответствии с [2] по гибкости $\lambda=\mu l/i$, где μ=0,7 для жесткой заделки, l – длина колонны (принята 4,06 м), $i=I_x/A$ – радиус инерции (зависит от A и W_x, так как для двутавра $I_x=W_x\cdot h/2$).

Вероятностный анализ проводился методом Монте-Карло с числом реализаций N_{sim}=100 000 в среде Excel. В результате была получена оценка вероятности отказа колонны по критерию устойчивости. Вероятность отказа составила $P_f \approx 0{,}0572$ (5,72 %) (рис.).

Для определения степени влияния каждого случайного параметра на надежность был проведен анализ чувствительности. Методом «один фактор за раз» были зафиксированы все параметры на их средних номинальных значениях, кроме одного, который варьировался согласно своему закону распределения.

Результаты анализа

Расчетное сопротивление стали Ry20 является доминирующим фактором с корреляцией 0,96. Его коэффициент вариации в 5 % обуславливает более 90 % общей дисперсии функции отклика Z.

Коэффициент устойчивости φ (корреляция -0,65) оказывает заметное противодействующее влияние: его увеличение повышает надежность, но не компенсирует снижение прочности стали.

Момент сопротивления Wx (корреляция 0,27) имеет умеренное влияние.

Геометрические параметры A и модуль упругости E (корреляции < 0,02) практически не влияют на вероятность отказа.

Вопрос о допустимом уровне вероятности отказа для строительных конструкций является сложным и зависит от класса ответственности здания, последствий отказа и экономических факторов. В нормативных документах РФ явные значения не регламентированы, но им соответствуют наборы частных коэффициентов надежности. Для обычных зданий и сооружений (2-й уровень ответственности) в современных вероятностных стандартах (например, еврокодах) часто ориентируются на годовую вероятность отказа порядка $10^{-4}...10^{-6}$ для предельного состояния несущей способности [6]. Полученная в модели оценка $P_f \approx 0{,}0572$ (5,72 %) указывает на недопустимо низкий уровень безопасности конструкции и указывает на недостаточную надежность колонны в рассмотренных условиях нагрева.

Для снижения вероятности отказа до приемлемого уровня можно рассмотреть следующие меры:

1. Ужесточение контроля качества стали (снижение коэффициента вариации R_y).
2. Увеличение номинального сечения колонны (переход на более мощный профиль).
3. Применение огнезащитной облицовки для снижения скорости и максимальной температуры нагрева колонны, что уменьшит коэффициент снижения kred.
4. Проектирование с увеличенным коэффициентом запаса ($\gamma c \geq 1{,}2$) для условий пожара.

Чувствительность модели позволяет обоснованно выбирать наиболее эффективную из этих мер.

В работе продемонстрировано применение вероятностного подхода и метода Монте-Карло для оценки надежности стальной внецентренно-сжатой колонны при нагреве. Установлено, что при заданных данных и 30-процентном снижении прочности из-за нагрева вероятность потери устойчивости составляет около 5,72 %. Критически важным случайным параметром является предел текучести стали. Его влияние на порядок превосходит влияние всех остальных факторов вместе взятых.

Предложенная методика позволяет:

1. Количественно оценить уровень безопасности элемента в сложных условиях эксплуатации.
2. Выявить наиболее значимые источники неопределенности, влияющие на надежность.
3. Обосновать технические решения, направленные на снижение риска (выбор материала, сечения, средств огнезащиты).
4. Определить приоритетные параметры для входного контроля на строительной площадке или производстве.
5. Обосновать необходимость обязательных противопожарных мероприятий для стальных конструкций, работающих при повышенных температурах.

Таким образом, использование вероятностных методов, таких как метод Монте-Карло, является перспективным направлением для совершенствования норм проектирования и перехода к концепции проектирования, основанной на оценке риска.

Литература

1. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 27 февраля 2017 г. № 126/пр : введен 28.08.2017. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 28.09.2026). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 декабря 2016 г. № 891/пр : введен 04.06.2017. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 28.09.2026). – Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Соловьева, А. А. Вероятностные модели случайных величин в строительном проектировании / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2024. – 144 с.
4. Метод Монте-Карло и инструментальные средства его реализации : методические указания / А. В. Раменская, К. В. Пивоварова ; Оренбургский государственный университет. – Оренбург : ОГУ, 2018. – 58 с.
5. Соловьев, С. А. Метод вероятностного анализа надежности элементов конструкций на основе граничных функций распределения / С. А. Соловьев, А. А. Соловьева // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 10. – С. 1545–1555.
6. EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design.
7. Reliability of Steel Properties and Its Implications for Design / M. Sykora, J. Markova, M. Holicky // Proceedings of the 4th International Workshop on Reliable Engineering Computing. – 2010. – P. 447–462.
8. Анализ надежности конструкций стальных покрытий с использованием теории свидетельств / С. А. Соловьев, А. Э. Иньков, А. А. Соловьева, В. А. Смирнов // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 8. – С. 1274–1284.

A.S. Toshchakova
Vologda State University

BUCKLING FAILURE PROBABILITY OF STEEL RODS

The article presents a probabilistic approach to estimating the probability of stability loss of a 35K2 uncenterically compressed steel column operating under heating conditions. Heating is accounted for by reducing the design resistance of the steel. The Monte Carlo method is used to evaluate the effect of a random variation in the mechanical characteristics of steel and geometric parameters on the bearing capacity of the column according to the stability criterion. The proposed approach makes it possible to quantify the reliability of an element, identify the most significant risk factors, and justify the necessary tolerances or design measures to ensure the required safety.

Probability of failure, stability, steel rod, random variables, software package, probabilistic design, steel structures, safety, data analysis.