

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 3. С. 134–142.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (3): 134–142.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 693.22:624.04

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-134-142

EDN: JCCLBV

ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КАРКАСА НА РАЗЛИЧНОЙ СТАДИИ РАБОТЫ СТАЛИ

Иван Иванович Подшивалов

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Объектом исследования являются прочность и устойчивость металлического каркаса в условиях линейной и физически нелинейной работы стали по билинейной диаграмме при статическом нагружении.

Цель работы состоит в анализе прочности металлического каркаса с применением коэффициента конструктивной прочности в линейном расчете и коэффициента использования несущей способности, определенного на основании теории расчета по предельной поверхности элементов, а также линейной и физически нелинейной устойчивости на основе концепции предельной отпорности системы.

Методы исследования. Расчетное обоснование прочности и устойчивости металлического каркаса на различной стадии работы стали выполнено в программном комплексе Ing+2021 MicroFe с разработкой расчетной конечно-элементной пространственной модели.

Результаты. Получены результаты, когда при обеспечении конструктивной прочности и несущей способности металлического каркаса, а также его линейной устойчивости критический параметр в условиях физически нелинейной устойчивости оказался меньше нормируемого значения, в результате чего не выполняется условие устойчивости металлического каркаса по первой группе предельных состояний.

Ключевые слова: металлический каркас, прочность, несущая способность, устойчивость, линейная и нелинейная работа, расчетная модель

Для цитирования: Подшивалов И.И. Прочность и устойчивость металлического каркаса на различной стадии работы стали // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 3. С. 134–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-134-142. EDN: JCCLBV

ORIGINAL ARTICLE

**STRENGTH AND STABILITY OF METAL FRAME
AT DIFFERENT STAGES OF STEEL PERFORMANCE****Ivan I. Podshivalov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia*

Abstract. The object of the study is the strength and stability of the metal frame during linear and nonlinear steel operation according to a bilinear diagram under static loading.

Purpose: The analysis of the metal frame strength using the structural strength factor in the linear calculation and the load-bearing capacity use factor in theoretical calculation of the limit element surface as well as the linear and nonlinear stability based on the concept of the system limit repulsion.

Methodology: The computational substantiation of the bearing capacity and stability of the reinforced concrete frame at different stages of materials performance, is carried out in the Ing+2021 MicroFe program with the proposed finite element spatial model.

Research findings: At the structural strength and bearing capacity of the metal frame and its linear stability, the critical parameter at physically nonlinear stability is less than the standardized value, as a result of which the metal frame stability is not fulfilled for ultimate limit state.

Keywords: metal frame; strength, bearing capacity, stability, linear and nonlinear work, calculation model

For citation: Podshivalov I.I. Strength and stability of metal frame at different stages of steel performance. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (3): 134–142. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-134-142. EDN: JCCLBV

Обеспечение прочности и устойчивости при проектировании металлических конструкций является условием выполнения предельных состояний первой группы [1, 2]. В то же время обеспечение несущей способности, основанной на недопустимости достижения предельных состояний, при проектировании и эксплуатации строительных конструкций довольно часто не выполняется и может привести к негативным последствиям [3, 4]. В стержневых конструкциях отказ одного элемента, вследствие достижения им аварийного состояния, может вызвать цепную реакцию отказов других стержневых элементов, приводя к частичной или к полной потере несущей способности здания или сооружения [5, 6].

Расчет на прочность стержневых элементов стальных конструкций выполняется по предельному состоянию в наиболее нагруженном сечении с заданными относительными эксцентриситетами, из которого определяются внутренние усилия с учетом упругой работы материала при динамических нагрузках или упругопластической работы материала при статических нагрузках [7, 8]. Расчет стержневых металлических систем в нелинейной постановке можно выполнить по теории предельных поверхностей по методике, приведенной, например, в работе [9], где по экспериментальным результатам испытания железобетонных колонн в нелинейной деформационной модели построены области прочности нормального сечения «N-M-M» и «N-e-e», получены их огибающие поверхности, проведена оценка влияния варьируемых

параметров на прочность и разработаны рекомендации по обоснованию прочности при косом внецентренном сжатии.

Благодаря использованию расчетных программ в проектировании стало возможным выполнение расчета стержневых систем путем непосредственного анализа их равновесия с учетом перемещений от внешних воздействий – расчет по деформированной схеме. При этом появилась возможность проверки общей устойчивости всего сооружения, в отличие от поэлементной проверки устойчивости по нормам проектирования [10].

При расчете устойчивости стержневых элементов стальных конструкций с учетом физической нелинейности аналитическое решение деформационной задачи сжато-изогнутых в двух плоскостях упругих стержней может быть построено с учетом физической нелинейности стали путем дополнительного догружения упругого стержня фиктивной силой с двухосными эксцентриситетами [11].

В концепции расчета конструкций по предельному поведению В.В. Катюшина в рамных конструкциях может возникнуть ситуация, когда сложно определить критерии их предельного состояния и, как следствие, необходимые запасы прочности и устойчивости [12]. Так, изменения общих характеристик элементов, таких как продольная и изгибная жесткости, отпорность, которые могут быть обусловлены локальными пластическими деформациями, влияют на глобальное поведение всей системы, содержащей эти элементы.

По вышеприведенной концепции В.В. Катюшина А.В. Перельмутер понятие «предельное состояние» дополняет характеристикой поведения системы, которая определяется скоростью изменения реакции системы при изменении внешнего воздействия [13]. В качестве измерителя предлагается использовать уменьшение угла наклона кривой состояний равновесия, которое характеризует потерю отпорности, что может быть применено для оценки близости конструкции к состоянию отказа, которое возникает при нулевой отпорности системы.

В настоящей статье объектом исследования является металлический каркас здания склада. Размеры здания в плане – 15×36 м, номинальная высота до низа конструкций покрытия – 6,8 м (рис. 1).

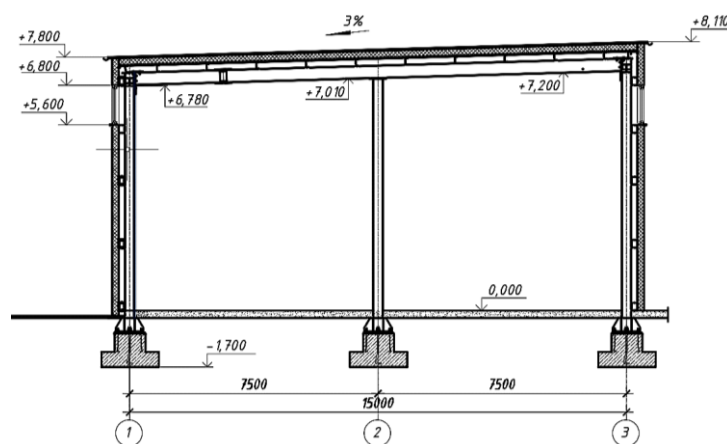


Рис. 1. Схема поперечного разреза металлического каркаса

Fig. 1. Schematic of the cross section of the metal frame

Каркас здания выполнен по рамно-связевой схеме. Продольная устойчивость каркаса обеспечивается вертикальными связями по колоннам, а поперечная устойчивость – за счет статической работы двух пролетных рам. Пролет рам – 7,5 м, шаг – 6,0 м и высота – 6,8 м. Сопряжение с фундаментом колонн рам, выполненных из прокатного двутавра I30K1, жесткое. Несущими конструкциями покрытия являются металлические балки, выполненные из широкополочного двутавра I40Ш1, по которым уложены прогоны покрытия, устроенные из швеллеров U22, с шагом 1,5 м. Сопряжение балок покрытия с крайними колоннами жесткое, опирание балок покрытия на средние колонны выполнено по неразрезной схеме. Несущие ограждающие конструкции каркаса устроены из металлических сэндвич-панелей: стеновых и кровельных. Уклон кровли составляет 3 %.

В программном комплексе Ing+2021 MicroFe с использованием стержневых конечных элементов была разработана конечно-элементная модель металлического каркаса (рис. 2). Все нагрузки статические.

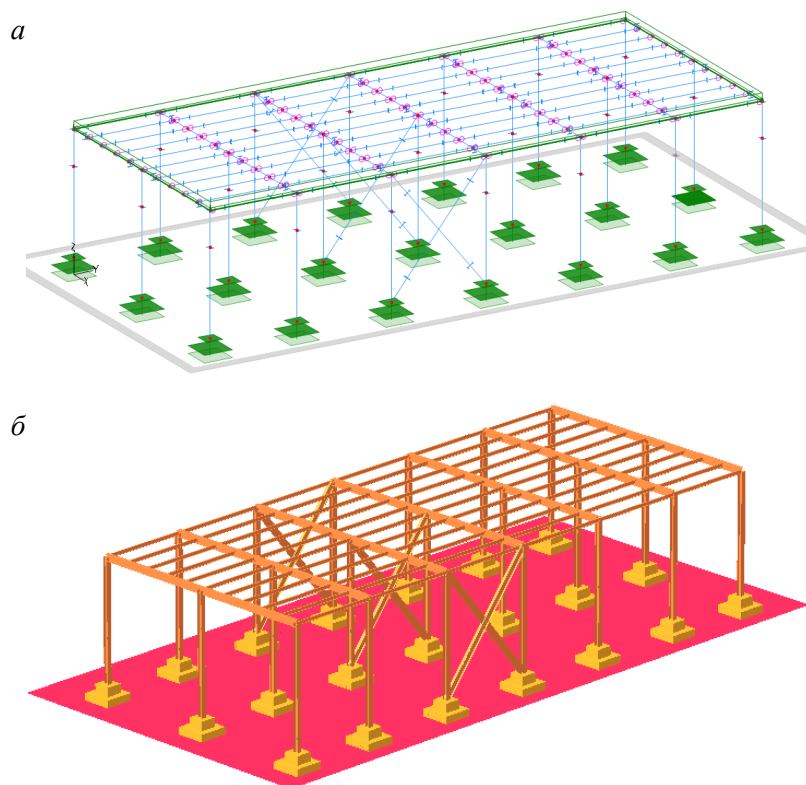


Рис. 2. Расчетная конечно-элементная модель (а) и ее визуализация (б) (прогоны под колоннами для крепления стеновых сэндвич-панелей условно не показаны)

Fig. 2. FEM (a) and model visualization (b)

В расчетной модели были рассмотрены четыре расчетные схемы:

– расчетная схема № 1 – линейный расчет металлического каркаса на прочность и жесткость;

– расчетная схема № 2 – нелинейный расчет металлического каркаса по теории предельных поверхностей конструктивных элементов;

– расчетная схема № 3 – линейный расчет металлического каркаса на устойчивость;

– расчетная схема № 4 – физически нелинейный расчет металлического каркаса на устойчивость по концепции предельной отпорности с применением основной формы собственных колебаний с минимальным значением коэффициента использования критической нагрузки. Здесь заданы следующие характеристики билинейной диаграммы деформирования стали: предел пропорциональности – 200 МПа; максимальное напряжение в крайней точке диаграммы – 250 МПа; модуль упругости на линейном участке – 206 ГПа; модуль упругости в крайней точке диаграммы равен нулю.

Расчетная схема № 1. Изополя коэффициента использования конструктивной прочности в элементах металлического каркаса приведены на рис. 3, который демонстрирует, что наибольший уровень нагружения отмечен в колоннах с максимальным значением коэффициента использования сечения по условию устойчивости плоской формы изгиба $\max K_{ик} = 0,97 < 1$. Отсюда следует, что условие прочности по первой группе предельных состояний для элементов металлического каркаса выполнено.

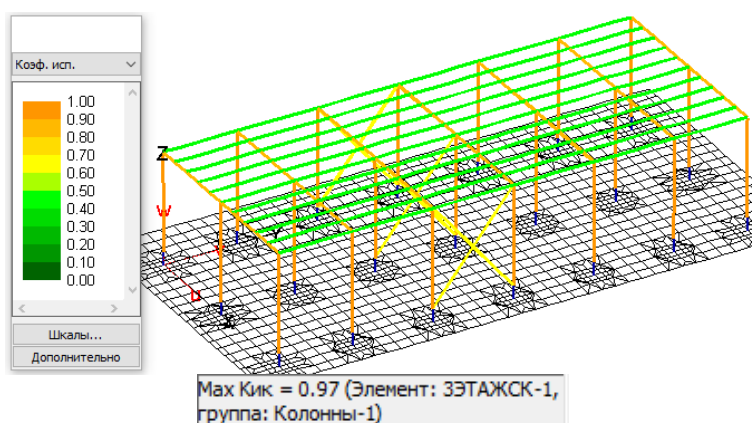


Рис. 3. Изополя коэффициента использования конструктивной прочности в элементах металлического каркаса в расчетной схеме № 1

Fig. 3. Isofields of strength use factor in metal frame elements in design model 1

Расчетная схема № 2. Изополя коэффициента использования несущей способности, определенного по предельной поверхности элементов (рис. 4), показывают, что его максимальное значение в наиболее нагруженных элементах каркаса – колоннах – составляет $\max k = 0,806627$ и не превышает единицы. Как и в предыдущем случае, несущая способность элементов каркаса по первой группе предельных состояний обеспечена.

Следует отметить, что при упругой работе элементов каркаса в расчетной схеме № 1 величина коэффициента использования сечения по условию устойчивости плоской формы изгиба $\max K_{ик} = 0,97$ меньше единицы всего на 3 %, а в нелинейном расчете каркаса по теории предельных поверхностей

конструктивных элементов в расчетной схеме № 2 значение коэффициента использования по несущей способности $\max k = 0,806627$ меньше единицы уже на 19 %. Таким образом, учет упругопластической работы стали показывает фактический запас по несущей способности металлического каркаса до наступления его предельного состояния.

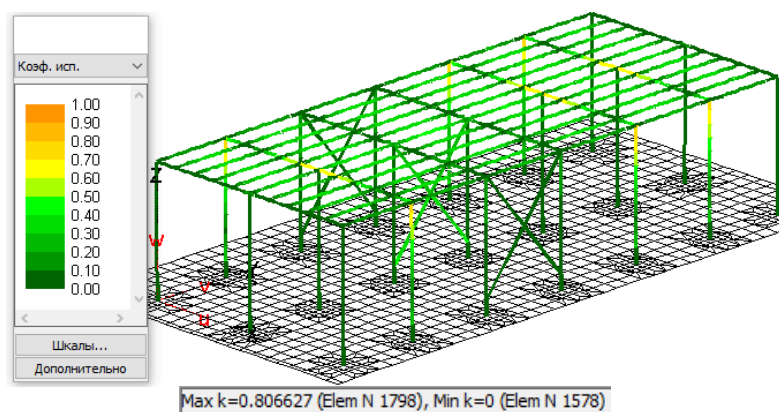


Рис. 4. Изополя коэффициента использования по несущей способности элементов металлического каркаса в расчетной схеме № 2

Fig. 4. Isofields of bearing capacity use factor of metal frame in design model 2

Расчетная схема № 3. Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний показана на рис. 5. Форма колебаний соответствует крутильно-изгибной форме. Для этой формы собственных колебаний коэффициент использования критической нагрузки (критический параметр) $p = 2,1888$, что превышает необходимый нормативный запас по устойчивости, равный 2. Следовательно, условие устойчивости металлического каркаса по первой группе предельных состояний выполнено.

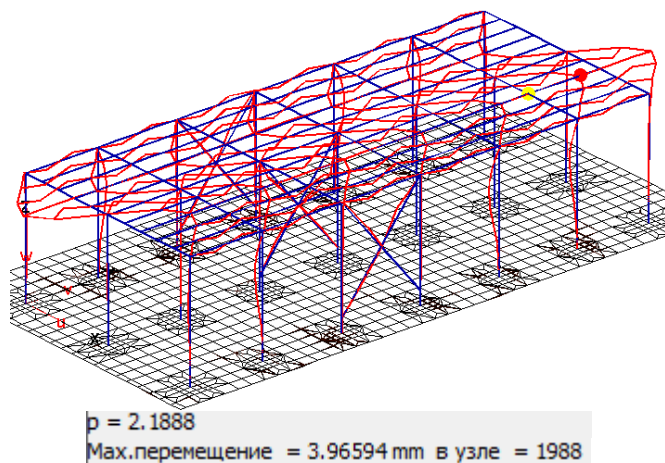


Рис. 5. Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний в расчетной схеме № 3 ($\times 1000$)

Fig. 5. Deformation of fundamental harmonics in design model 3 (magnification: 1000 $\times$)

Расчетная схема № 4. Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний приведена на рис. 6. Форма колебаний, как и в предыдущем случае, соответствует крутильно-изгибной форме. Для этой формы собственных колебаний критический параметр $p = 1,07679$, что практически в два раза меньше необходимого двойного нормативного запаса по устойчивости, в результате чего условие устойчивости металлического каркаса по первой группе предельных состояний уже не выполняется.

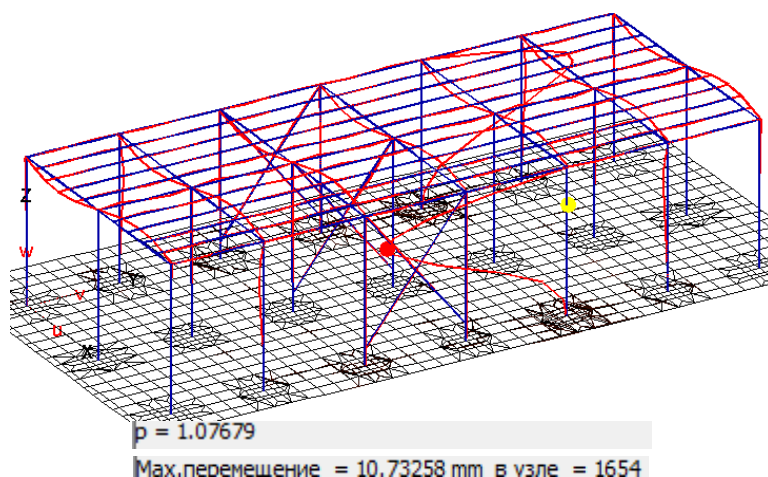


Рис. 6. Деформированная схема основной первой формы собственных колебаний в расчетной схеме № 4 ($\times 1000$)

Fig. 6. Deformation of fundamental harmonics in design model 4 (magnification: 1000 $\times$)

В заключение следует отметить, что в расчете металлического каркаса на действие статических нагрузок в случае допущения нелинейной работы стали по билинейной диаграмме деформирования учет физической нелинейности при расчете на устойчивость оказался определяющим результатом расчета и его невыполнение привело бы к недостоверным результатам.

Принятые проектные значения поперечных сечений элементов металлического каркаса оказались недостаточными для выполнения условий по первой группе предельных состояний. В этом случае, при заданном уровне статического нагружения металлического каркаса, основным критерием в подборе необходимых размеров поперечного сечения элементов каркаса будет являться выполнение условия устойчивости при физически нелинейной работе стали.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудишин Ю.И. Металлические конструкции. Москва : Академия, 2011. 688 с.
2. Одесский П.Д. О теориях прочности и эффекте второй нагрузки применительно к стальным строительным конструкциям // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 20–24.
3. Карпенко Н.И., Колчунов В.И. О концептуально-методологических подходах к обеспечению конструктивной безопасности // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 1. С. 4–8.

4. Гукова М.И., Искендеров В.Г., Фарфель М.И. Ошибки проектирования, изготовления и монтажа, приводящие к аварийному состоянию строительных конструкций производственных зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 10. С. 25–28.
5. Востров В.К. Предельные состояния и вопросы прочности и конструктивной безопасности строительных металлоконструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 5. С. 20–23.
6. Туснин А.Р., Бергер М.П. Расчет металлической фермы с поврежденными элементами // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 11. С. 35–41.
7. Белый Г.И. «Обратный» метод расчета усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций путем увеличения сечений // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 46–55.
8. Боровский Д.С. Расчет на прочность усиливаемых под нагрузкой стержневых элементов стальных конструкций при многопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 2 (85). С. 36–41.
9. Семенов Д.А. Прочность железобетонных элементов при косом внецентренном сжатии // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 5. С. 76–84.
10. Кудышин Ю.И. К вопросу расчета начальных несовершенств при расчете стальных стержневых систем по деформированной схеме // Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 3. С. 6–9.
11. Белый Г.И. Деформационный расчет и устойчивость стержневых элементов стальных конструкций с несимметричным сечением // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 4 (87). С. 44–53.
12. Катюшин В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения (расчет, проектирование, строительство). Москва : Изд-во АСВ, 2018. 1072 с.
13. Перельмутер А.В. Использование критерия отпорности для оценки предельного состояния конструкции // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. Вып. 12. С. 1559–1566.

REFERENCES

1. Kudishin Y.I. Metal constructions. Moscow: Academia, 2011. 688 p. (In Russian)
2. Odesskiy P.D. Strength theories and the effect of second load in relation to steel building structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2013; (10): 20–24. (In Russian)
3. Karpenko N.I., Kolchunov V.I. Conceptual-methodological approach to structural safety provision. *Stroitelnaia mekhanika i raschet sooruzhenii*. 2007; (1): 4–8. (In Russian)
4. Gukova M.I., Iskenderov V.G., Farfel M.I. Design, manufacture and installation errors leading to building structure emergency. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2013; (10): 25–28. (In Russian)
5. Vostrov V.K. Limit states, durability and constructive safety of steel structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2010; (5): 20–23. (In Russian)
6. Tusnin A.R., Berger M.P. Strength analysis of metal truss with damaged elements. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2018; (11): 35–41. (In Russian)
7. Bely G.I. Reverse method of calculation of steel rod elements under load by increasing cross-sections. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2020; 6 (83): 46–55. (In Russian)
8. Borovskiy D.S. Strength analysis of reinforced rod elements under multiparameter load. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 2 (85): 36–41. (In Russian)
9. Semyonov D.A. Strength of reinforced concrete elements under oblique off-center compression. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2015; (5): 76–84. (In Russian)
10. Kudishin Yu.I. Initial imperfection analysis of steel rod systems under deformation scheme. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2011; (3): 6–9. (In Russian)
11. White G.I. Deformation and stability analysis of the steel structure elements with asymmetric cross-section. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2021; 4 (87): 44–53. (In Russian)
12. Katyushin V.V. Buildings with steel frame frames of variable cross-section (calculation, design, construction). Moscow: ASV, 2018. 1071 p. (In Russian)
13. Perelmuter A.V. Repulsion criterion in estimating structural limit state. *Vestnik MGSU*. 2021; 16 (12): 559–1566. (In Russian)

Сведения об авторе

Подшивалов Иван Иванович, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, ivanpodchivalov@list.ru

Author Details

Ivan I. Podshivalov, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, ivanpodchivalov@list.ru

Статья поступила в редакцию 04.12.2023
Одобрена после рецензирования 28.12.2023
Принята к публикации 19.04.2024

Submitted for publication 04.12.2023
Approved after review 28.12.2023
Accepted for publication 19.04.2024