

СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

ISSN 2073-7416

BUILDING AND RECONSTRUCTION

№4 (114) 2024

июль-август

Теория инженерных сооружений.
Строительные конструкции

The theory of
engineering

Безопасность зданий
и сооружений

Building and

Архитектура
и градостроительство

Architecture
and urban

Строительные материалы
и технологии

Building
materials



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL

Главный редактор:
Колчунов В.И., *акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Заместители главного редактора:
Гордон В.А., *советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Коробко В.И., *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Савин С.Ю., *канд. техн. наук, доц. (Россия)*

Финадеева Е.А., *канд. техн. наук, доц. (Россия)*

Редакция:
Акимов П.А., *акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Бакаева Н.В., *советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Бок Т., *д-р техн. наук, проф. (Германия)*

Булгаков А.Г., *д-р техн. наук, проф. (Германия)*

Данилевич Д.В., *канд. техн. наук, доц. (Россия)*

Ерофеев В.Т., *акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Есаулов Г.В., *акад. РААСН, д-р арх., проф. (Россия)*

Карпенко Н.И., *акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Колесникова Т.Н., *д-р арх., проф. (Россия)*

Колчунов В.И., *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Коробко А.В., *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Король Е.А., *чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Кривошапко С.Н., *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Кудряшов Н.Н., *канд. арх., проф. (Россия)*

Лефай З., *д-р техн. наук, проф. (Франция)*

Мелькумов В.Н., *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Орлович Р.Б., *д-р техн. наук, проф. (Польша)*

Птичникова Г.А., *д-р арх., проф. (Россия)*

Ребољж Д., *д-р техн. наук, проф. (Словения)*

Римшин В.И., *чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Тамразян А.Г., *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Травуш В.И., *акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Трещев А.А., *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Тур В.В., *д-р техн. наук, проф. (Белоруссия)*

Турков А.В., *д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Федоров В.С., *акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Федорова Н.В., *советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

Шах Р., *д-р техн. наук, проф. (Германия)*

Яковенко И.А., *д-р техн. наук, проф. (Украина)*

Исполнительный редактор:

Амелина М.А., *(Россия)*

Адрес редакции:

302030, Орловская обл., г. Орёл,

ул. Московская, д. 77.

Тел.: +79065704999

http://oreluniver.ru/science/journal/sir

E-mail: str_and_rek@mail.ru

Зарегистрировано в Федеральной службе

по надзору в сфере связи, информационных

технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство: ПИ №ФС 77-67169

от 16 сентября 2016 г.

Подписной индекс **86294**

по объединенному каталогу «Пресса России»

на сайтах www.pressa-ru.ru и www.akc.ru

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2024

Содержание

Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Моисеенко Г.А.** Диаграммы деформирования арматуры при совместном действии нагрузок и повышенных температур до +500°С..... 3
- Колчунов В.И., Федоров С.С.**, Определение уровня расстояния между трещинами в железобетонных конструкциях 14
- Кривошапко С.Н.** Аналитические поверхности с плоским контуром и суперэллипсами главного каркаса 28
- Лалин В.В., Лалина И.И., Нго Х.Х., Ле Ч.М.Д.** Алгоритм метода сил в форме метода контурных усилий..... 42
- Трошин М.Ю., Турков А.В.** Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний в 3-хслойной плите из ДПК при переменной величине зазоров в поперечном слое при различных граничных условиях..... 56
- Тур В.В., Надольский В.В.** Методы оценки коэффициента вариации несущей способности при проектировании конструкций на основе нелинейных конечно-элементных моделей..... 64

Безопасность зданий и сооружений

- Мацевич Т.А., Шкарпова О.Г., Саиян С.Г.** Устойчивость сжатых металлических элементов при комбинированных температурных и сейсмических воздействиях..... 75
- Савин С.Ю., Шарипов М.З., Амелина М.А.** Несущая способность длительно нагруженных внецентренно сжатых железобетонных..... 90

Архитектура и градостроительство

- Глебушкина Л.В., Токарев А.Е.** Инфраструктурные предпосылки пространственного развития Иркутской области в составе Ангаро-Енисейского макрорегиона..... 105

Строительные материалы и технологии

- Зубарев К.П., Сапронова Ю.А., Алиханова З.Р., Зобнина Ю.С., Будник Ф.А., Федосеев В.Д.** Нестационарное температурное поле стен зданий при значениях эксплуатационной влажности строительных материалов..... 122
- Ткач Е.В., Шусев Г., Рахимова Г.М., Рахимов М.А.** Модифицированный тяжелый бетон для конструкций тоннелей с повышенными эксплуатационными свойствами..... 138

Editor-in-Chief

Kolchunov V.I., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Editor-in-Chief Assistants:

Gordon V.A., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Korobko V.I., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Savin S.Yu., *candidate sc. tech., docent (Russia)*

Finadeeva E.A., *candidate sc. tech., docent (Russia)*

Editorial Board

Akimov P.A., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Bakaeva N.V., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Bock T., *doc. sc. tech., prof. (Germany)*

Bulgakov A.G., *doc. sc. tech., prof. (Germany)*

Danilevich D.V., *candidate sc. tech., docent (Russia)*

Erofeev V.T., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Esaulov G.V., *doc. arc., prof. (Russia)*

Karpenko N.I., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Kolesnikova T.N., *doc. arc., prof. (Russia)*

Kolchunov V.I., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Korobko A.V., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Korol E.A., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Krivoshapko S.N., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Kudryashov N.N., *candidate arc., prof. (Russia)*

Lafhaj Z., *doc. sc. tech., prof. (France)*

Melkumov V.N., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Orlovic R.B., *doc. sc. tech., prof. (Poland)*

Ptichnikova G.A., *doc. arc., prof. (Russia)*

Rebolj D., *doc. sc. tech., prof. (Slovenia)*

Rimshin V.I., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Tamrazyan A.G., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Travush V.I., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Treschev A.A., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Tur V.V., *doc. sc. tech., prof. (Belorussia)*

Turkov A.V., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Fedorov V.S., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Fedorova N.V., *doc. sc. tech., prof. (Russia)*

Schach R., *doc. sc. tech., prof. (Germany)*

Iakovenko I.A., *doc. sc. tech., prof. (Ukraine)*

Managing Editor:

Amelina M.A., *(Russia)*

The edition address:

302030, Oryol region., Oryol,

Moskovskaya Street, 77

+79065704999

<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>

E-mail: str_and_rek@mail.ru

Journal is registered in Russian federal service for monitoring communications, information technology and mass communications

The certificate of registration:

ПН №ФЦ 77-67169 from 16.09.2016 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossi»

86294 on the websites www.pressa-ff.ru and

www.akc.ru

© Orel State University, 2024

Contents

Theory of engineering structures. Building units

Karpenko N.I., Karpenko S.N., Moiseenko G.A. <i>Diagrams of reinforcement deformation under the combined action of loads and elevated temperatures up to +500 °C</i>	3
Kolchunov V.I., Fedorov S.S. <i>Definition level distance between cracks in reinforced concrete structures</i>	14
Krivoshapko S.N. <i>Analytical surfaces with a plane contour and with superellipses of the main frame</i>	28
Lalin V.V., Lalina I.I, Ngo H.H., Le T.M.D. <i>The force method algorithm in the form of a loop resultant method</i>	42
Troshin M.Yu., Turkov A.V. <i>Relationship of maximum deflections and natural frequencies vibrations in a three-layer CLT panel with variable gaps in the transverse layer under different boundary conditions</i>	56
Tur V.V., Nadolski V.V. <i>Methods for estimating the coefficient of variation of the resistance in the design of structures based on nonlinear finite element models</i>	64

Building and structure safety

Matseevich T.A., Shkarpova O.G., Saiyan S.G. <i>Stability of compressed metal elements under combined temperature and seismic effects</i>	75
Savin S.Y., Sharipov M.Z., Amelina M.A. <i>Capacity of compressed reinforced concrete element under dynamic load considering effect of long-term preloading</i>	90

Architecture and urban planning

Glebushkina L.V., Tokarev A.E. <i>Infrastructural prerequisites for the spatial development of the Irkutsk region as part of the Angara-Yenisei macroregion</i>	105
--	-----

Construction materials and technologies

Zubarev K.P., Saponova Y.A., Alikhanova Z.R., Zobnina Y.S, Budnik F.A., Fedoseev V.D. <i>Unsteady-state temperature field of building walls using building materials operating moisture values</i>	122
Tkach E.V., Shusev G., Rakhimova G.M., Rakhimov M.A. <i>Modified heavy concrete for tunnel structures with increased operational properties</i>	138

Н.И. КАРПЕНКО¹, С.Н. КАРПЕНКО¹, Г.А. МОЙСЕЕНКО¹

¹НИИСФ РААСН, Москва, Россия

ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ АРМАТУРЫ ПРИ СОВМЕЩНОМ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗОК И ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР ДО +500°C

Аннотация. Реальные нелинейные диаграммы деформирования арматуры и бетона составляют основу современного диаграммного метода расчета железобетонных конструкций. Данный метод позволяет наиболее точно учитывать физико-механические и реологические свойства железобетона при различных режимах силового нагружения конструкций. Для распространения диаграммного метода на расчет железобетонных конструкций при совместном действии нагрузок и повышенных температур необходима существенная корректировка диаграмм деформирования арматуры и бетона. В данной статье рассматривается переход от диаграмм деформирования арматуры при нормальной температуре к диаграммам деформирования при совместном действии силовых и температурных воздействий до +500°C. При этом изменяются основные физико-механические характеристики диаграмм в зависимости от значений температуры нагрева. Рассматриваются изменения этих характеристик для двух видов арматуры – без площадки текучести и с площадкой текучести. Полученные результаты представляют основу для построения метода расчета железобетонных конструкций при совместном действии нагрузок и различных режимов нагрева.

Ключевые слова: арматура, температурные воздействия, диаграммы деформирования арматуры, арматура без площадки текучести, арматура с площадкой текучести, диаграммный метод расчета конструкций.

N.I. KARPENKO¹, S.N. KARPENKO¹, G.A. MOISEENKO¹

¹NIISF RAASN, Moscow, Russia

DIAGRAMS OF REINFORCEMENT DEFORMATION UNDER THE COMBINED ACTION OF LOADS AND ELEVATED TEMPERATURES UP TO +500 °C

Abstract. Real nonlinear diagrams of reinforcement and concrete deformation form the basis of the modern diagrammatic method for calculating reinforced concrete structures. This method allows for the most accurate consideration of the physico-mechanical and rheological properties of reinforced concrete under various modes of force loading of constructions. To extend the diagrammatic method to the calculation of reinforced concrete structures under the combined action of loads and elevated temperatures, a significant adjustment of the deformation diagrams of reinforcement and concrete is necessary. This article discusses the transition from reinforcement deformation diagrams at normal temperature to deformation diagrams under the combined action of force and temperature influences up to +500°C. At the same time, the basic physical and mechanical characteristics of the diagrams change depending on the values of the heating temperature. Changes in these characteristics are considered for two types of reinforcement – without yield point and with yield point. The results obtained provide the basis for constructing a method for calculating reinforced concrete structures under the combined action of loads and various heating modes.

Keywords: reinforcement, temperature effects, reinforcement deformation diagrams, reinforcement without yield point, reinforcement with yield point, a diagrammatic method for calculating constructions.

© Карпенко Н.И., Карпенко С.Н., Моисеенко Г.А., 2024

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корсун В.И. Развитие методов расчета железобетонных конструкций зданий и сооружений на температурно-влажностные воздействия // Современное промышленное и гражданское строительство. 2021. Т. 17. № 1. С. 29-40.
2. Корсун В.И., Кхон Кхемарак, Ха Ван Куинь. Температурные моменты в статически неопределимых балках из высокопрочного бетона при одностороннем нагреве // В сборнике: Неделя науки ИСИ. Материалы всероссийской конференции в 3-х частях. Инженерно-строительный институт Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Санкт-Петербург, 2021. С. 382- 384.
3. Rehman A., Masood A., Akhtar S., Ibrahim S.M., Shariq M. Experimental and numerical investigation into flexural bond strength of RC beams exposed to elevated temperature // Construction and Building Materials. 2021. (282). С. 122630.
4. Liu Jin, Renbo Zhang, Liang Li, Xiuli Du, Yunlong Yao. Impact behavior of SFRC beams at elevated temperatures: Experimental and analytical studies // Engineering Structures. 2019. (197). С. 109401. DOI:10.1016/j.engstruct.2019.109401.
5. Кхон Кхемарак, Корсун В.И., Ха Ван Куинь, Волков А.С. Влияние кратковременного нагрева до +90°C на деформацию и прочность высокопрочного бетона // Под ред. Б. Анатолийса, В. Николая, С. Виталия, Springer Nature Switzerland AG, 2020. С. 585-592. [Khemarak Khon, Vladimir Korsun, Quynh Ha, and Andrey Volkov. Effect of Short-Term Heating up to +90°C on Deformation and Strength 137 of High-Strength Concrete // Под ред. В. Анатолийса, В. Николая, С. Виталия, Springer Nature Switzerland AG, 2020. С. 585-592]. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_51.
6. Корсун В.И., Баранов А.О., Кхон Кхемарак, Ха Ван Куинь. Влияние температуры и продолжительности нагрева на свойства высокопрочного бетона, модифицированного органо-минеральными компонентами // Под ред. Н. Ватина, А. Бородина, Б. Тельтаева, Чам: Springer Nature Switzerland AG, 2021. С. 515-524. [Vladimir Korsun, Aleksey Baranov, Khemarak Khon, and Quynh Ha. The Influence of Temperature and Duration of Heating on the Properties of High-Strength Concrete Modified by Organo-Mineral Components // Под ред. Н. Ватин, А. Бородинес, В. Тельтаев, Чам: Springer Nature Switzerland AG, 2021. С. 515-524]. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_50.
7. Корсун В.И., Кхон Кхемарак, Ха Ван Куинь, Баранов А.О. Прочность и деформации высокопрочного бетона при кратковременном нагреве до +90°C // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. 2020. (896). С. 012035. [Korsun V.I., Khon K., Ha V.Q., and Baranov A.O. Strength and deformations of highstrength concrete under short-term heating conditions up to + 90°C // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. (896). С. 012035]. DOI: 10.1088/1757- 899X/896/1/012035.
8. Korsun V., Korsun A., Volkov A. Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to 200°C // MATEC Web of Conferences. 2013. (6). С. 1-8.
9. Korsun V., Shvets G. The calculation of creep deformation of high-strength concrete in relation to the conditions of exposure to elevated temperatures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. (896). С. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012039.
10. Mustafa M.A., Yusof K.M. Mechanical properties of hardened concrete in hothumid climate // Cement and Concrete Research. 1991. № 4 (21). С. 601-613.
11. Mohd Zain M.F., Radin S.S. Physical properties of high-performance concrete with admixtures exposed to a medium temperature range 20°C to 50°C // Cement and Concrete Research. 2000. (30). С. 1283-1287.
12. Samir N.S. [и др.]. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete // Construction and Building Materials. 2011. (25). С. 688-696.
13. Корсун В.И., Баранов А.О. Расчёт температурно-усадочных деформаций высокопрочных бетонов применительно к условиям воздействия повышенных температур // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году: Сб. науч. тр. РААСН. М.: Издательство АСВ, 2020. С. 314- 321.
14. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. М., Стройиздат СССР, 1984.
15. Мадатян С.А. Арматура железобетонных конструкций. ООО «Воентехмет», М., 2000.
16. Милованов А.Ф., Тупов Н.И. Ползучесть и релаксация напряжений в бетоне зрелого возраста при длительном действии повышенных температур до 90°C. // Ползучесть и усадка бетона. Материалы совещания, подготовленные НИИЖБ Госстроя СССР. ЦИНИС, М., 1969.
17. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. М., Стандартинформ, 2019.

18. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко. – Москва: Стройиздат, 1996. – 416 с.
19. Карпенко Н.И. Методическое пособие «Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования» ФАУ "Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве". Москва, 2017, рук. работы Н.И. Карпенко.
20. Карпенко Н.И. Методическое пособие «Автоматизированные методы расчета массивных железобетонных конструкций при объемном напряженном состоянии» ФАУ "Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве". Москва, 2019, рук. работы Н.И. Карпенко, стр. 29-36.
21. СП 27.13330.2017. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. М., 2017.

REFERENCES

1. Korsun V.I. Development of methods for calculating reinforced concrete structures of buildings and structures for temperature and humidity effects. *Modern industrial and civil engineering*. 2021. Vol. 17. No. 1. Pp. 29-40.
2. Korsun V.I., Khon Khemarak, Ha Van Quynh. Temperature moments in statically indeterminate beams made of high-strength concrete with one-sided heating. [In the collection: Science Week of ISI. Proceedings of the All-Russian Conference in 3 parts.] *Civil Engineering Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. Saint Petersburg*, 2021. P. 382-384.
3. Rehman A., Masood A., Akhtar S., Ibrahim S.M., Shariq M. Experimental and numerical investigation into flexural bond strength of RC beams exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*. 2021. (282). C. 122630.
4. Liu Jin, Renbo Zhang, Liang Li, Xiuli Du, Yunlong Yao. Impact behavior of SFRC beams at elevated temperatures: Experimental and analytical studies. *Engineering Structures*. 2019. (197). P. 109401. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109401.
5. Khon Khemarak, Korsun V.I., Ha Van Quynh, Volkov A.S. Effect of Short-Term Heating up to +90°C on Deformation and Strength 137 of High-Strength Concrete. Ed. B. Anatolijs, V. Nikolai, S. Vitalii, Springer Nature Switzerland AG, 2020. P. 585-592. DOI: 10.1007/978-3-030-42351-3_51
6. Korsun V.I., Baranov A.O., Khon Khemarak, Ha Van Quynh. [Vladimir Korsun, Aleksey Baranov, Khemarak Khon, and Quynh Ha. The Influence of Temperature and Duration of Heating on the Properties of High-Strength Concrete Modified by Organo-Mineral Components. Ed. N. Vatin, A. Borodinecs, B. Teltayev, Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2021. P. 515-524. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_50
7. Korsun V.I., Khon Khemarak, Ha Van Quynh, Baranov A.O. Strength and deformations of highstrength concrete under short-term heating conditions up to + 90°C. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. (896). P. 012035. DOI: 10.1088/1757- 899X/896/1/012035
8. Korsun V., Korsun A., Volkov A. Characteristics of mechanical and rheological properties of concrete under heating conditions up to 200°C. *MATEC Web of Conferences*. 2013. (6). P. 1-8.
9. Korsun V., Shvets G. The calculation of creep deformation of high-strength concrete in relation to the conditions of exposure to elevated temperatures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. (896). C. 012039. DOI: 10.1088/1757-899X/896/1/012039
10. Mustafa M.A., Yusof K.M. Mechanical properties of hardened concrete in hot humid climate. *Cement and Concrete Research*. 1991. No. 4 (21). C. 601-613.
11. Mohd Zain M.F., Radin S.S. Physical properties of high-performance concrete with admixtures exposed to a medium temperature range of 20°C to 50°C. *Cement and Concrete Research*. 2000. (30). C. 1283-1287.
12. Samir N.S. [and etc.]. Effect of moisture and temperature on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 2011. (25). C. 688-696.
13. Korsun V.I., Baranov A.O. Calculation of temperature-shrinkage deformations of high-strength concretes in relation to conditions of exposure to elevated temperatures [Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2019: Coll. scientific. tr. RAASN. Moscow]: *ASV Publishing House*, 2020. Pp. 314-321.
14. Krichevsky A.P. Calculation of reinforced concrete engineering structures for temperature effects. Moscow, Stroyizdat USSR, 1984.
15. Madatyan S.A. Reinforcement of reinforced concrete structures. OOO Voentekhmet, Moscow, 2000.
16. Milovanov A.F., Tupov N.I. Creep and stress relaxation in mature concrete under long-term exposure to elevated temperatures up to 90 °C. Creep and shrinkage of concrete. Proceedings of the meeting prepared by the Research Institute of Reinforced Concrete of the USSR Gosstroy. TSINIS, Moscow, 1969.

- 17 .SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Moscow, Standartinform, 2019.
18. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics / N.I. Karpenko. - Moscow: Stroyizdat, 1996. - 416 p.
19. Karpenko N.I. Methodological manual "Statically indeterminate reinforced concrete structures. Diagrammatic methods of automated calculation and design" FAU "Federal Center for Normation, Standardization and Conformity Assessment in Construction". Moscow, 2017, supervised by N.I. Karpenko.
- 20 Karpenko N.I. Methodological manual "Automated methods for calculating massive reinforced concrete structures under volumetric stress state" FAU "Federal Center for Normation, Standardization and Conformity Assessment in Construction". Moscow, 2019, supervised by N.I. Karpenko, pp. 29-36.
21. SP 27.13330.2017. Concrete and reinforced concrete structures designed to work under conditions of elevated and high temperatures. М., 2017.

Информация об авторах

Карпенко Николай Иванович

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия, Академик РААСН, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории «Проблемы прочности и качества в строительстве»
E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Карпенко Сергей Николаевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия, д-р техн. наук
E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Моисеенко Георгий Александрович

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории «Проблемы прочности и качества в строительстве»
E-mail: gecklock@yandex.ru

Information about authors

Karpenko Nikolay Iv.

Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences", Moscow, Russia, Full member of RAACS, doctor in tech. sc., Prof., Chief Researcher of the Laboratory "Problems of Strength and Quality in Construction"
E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Karpenko Sergey N.

Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences", Moscow, Russia, doctor in tech. sc.
E-mail: niisf_lab9n@mail.ru

Moiseenko Georgy A.

Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences", Moscow, Russia, candidate in tech. sc., research fellow at the laboratory "Problems of Strength and Quality in Construction"
E-mail: gecklock@yandex.ru

В.И. КОЛЧУНОВ^{1,2}, С.С. ФЕДОРОВ¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Россия

²НИИСФ РААСН, Москва, Россия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕВОГО РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ТРЕЩИНАМИ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Аннотация. Приведена расчетная модель для определения уровневого расстояния между трещинами в железобетонных конструкциях. Модель построена на обобщении известной в теории трещин в железобетоне гипотезы Томаса Ф.Г. и ее обобщении В.И. Колчуновым применительно к усовершенствованной теории деформирования железобетона с трещинами. Суть предложенного обобщения состоит в том, что напряженное состояние в бетоне и арматуре в окрестности трещины и на участке между трещинами определяется с учетом деформационного эффекта, заключающегося в том, что при хрупком разрушении растянутой бетонной матрицы деформация берегов трещины сдерживаются реакцией арматурного стержня, а профиль трещины нелинейно искривляется. В результате относительные взаимные смещения бетона и арматуры и уровневое расстояние между трещинами определяются интегрированием эпюр распределения деформаций бетона и арматуры на различных участках в блоке двумя смежными трещинами. С использованием полученных аналитических зависимостей для расчета уровневого расстояния между трещинами проведены численные исследования по определению расстояния между трещинами и ширины раскрытия трещин. Полученные результаты сопоставлены с имеющимися результатами испытаний железобетонных конструкций, а также с результатами расчета по методикам российских и зарубежных норм. Показано, что расчетные зависимости предлагаемой модели полностью отражают полученную экспериментально качественную картину многоуровневого процесса образования трещин, когда при дискретном уменьшении расстояния между трещинами обратно пропорциональном изменению изгибающих моментов происходит увеличение ширины раскрытия трещин.

Ключевые слова: железобетон, уровневое расстояние между трещинами, деформации, раскрытие трещин, депланация, деформационный эффект.

VL.I. KOLCHUNOV^{1,2}, S.S. FEDOROV¹

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

²NIISF RAASN, Moscow, Russia

DEFINITION LEVEL DISTANCE BETWEEN CRACKS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract. A calculation model for determining level distance between cracks in reinforced concrete structures. The model is based on the generalization of the known in the F.G. Thomas hypothesis known in the theory of cracks in reinforced concrete and its generalization by V.I. Kolchunov in relation to the improved theory of deformation of reinforced concrete with cracks. The essence of the proposed generalization is that the stress state in concrete and reinforcement in the vicinity of the crack and in the area between the cracks is determined taking into account the deformation effect, which consists in the fact that at brittle fracture of the stretched concrete matrix the deformation of the crack banks is restrained by the reaction of the reinforcement bar, and the crack profile is nonlinearly curved. As a result, the relative mutual displacements of concrete and reinforcement and the level distance between cracks are determined by integrating the distribution diagrams of concrete and reinforcement strains at different locations in the block by two adjacent cracks.

© Колчунов В.И., Федоров С.С., 2024

Using the obtained analytical relationships for the calculation of the level distance between cracks, numerical investigations are carried out to determine the distance between cracks and the crack opening width. The obtained results are compared with the available test results of reinforced concrete structures, as well as with the results of calculation according to the methods of Russian and foreign standards. It is shown that the calculation dependences of the proposed model fully reflect the qualitative picture of the multilevel crack formation process obtained experimentally, when at discrete decrease of the crack spacing inversely proportional to the change of bending moments there is an increase in the crack opening width.

Keywords: *reinforced concrete, level distance between cracks, deformations, crack opening, deplanation, deformation effect*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, Mich: American Concrete Institute. 2014.
2. CEN (Comité Européen de Normalisation). Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings, EN 1992-1-1:2004. CEN, Brussels, 2004
3. CEB (Comité Euro-International du Béton). CEB-FIP Model Code 2010: Model Code for concrete structures. Ernst & Sohn, Wiley, Berlin, Germany, 2013. 434 p.
4. СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. Бетонные и железобетонные конструкции. Минск. 2020, 236с.
5. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения». (С Изм.№1 и Изм.№2). М.: ФГБУ "РСТ", 2022.
6. СП 311.1325800.2017 «Бетонные и железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. Правила проектирования». (С Изм.№1). М.: ФГБУ "РСТ", 2023.
7. Romashko V., Romashko-Maistruk O. Level formation and disclosure of normal cracks in reinforced concrete elements and structures // Procedia Structural Integrity. 2022. 36. Pp. 159–165.
8. Frosch R.J. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete // ACI Structural Journal. 1999. 96(3). Pp 437–442
9. Dey A., Valiukas D., Jakubovskis R., Sokolov A., Kaklauskas G. Experimental and Numerical Investigation of Bond-Slip Behavior of High-Strength Reinforced Concrete at Service Load // Materials. 2022. 15. 293. <https://doi.org/10.3390/ma15010293>.
10. Bado M. F., Casas J. R., Kaklauskas G. Distributed Sensing (DOFS) in Reinforced Concrete members for reinforcement strain monitoring, crack detection and bond-slip calculation // Engineering Structures. 2021. 226. 111385. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111385>
11. Schmidt M., Schmidt P., Wanka S., Classen M. Shear Response of Members without Shear Reinforcement—Experiments and Analysis Using Shear Crack Propagation Theory (SCPT) // Appl. Sci. 2021. 11. 3078. <https://doi.org/10.3390/app11073078>
12. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов Вл.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Коноров А.В. Основные результаты экспериментальных исследований железобетонных конструкций из высокопрочного бетона В100 круглого и кольцевого сечений при кручении с изгибом // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2019. №1. С. 51–61.
13. Травуш В.И., Конин Д.В., Крылов А.С. Прочность железобетонных балок из высокопрочных бетонов и фибробетонов // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 1(77). С. 90–100.
14. Alhashimi O.I.M. Experimental Studies of Strength Inclined Sections Bent Elements from Autoclaved Aerated Concrete // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1079. № 022062.
15. Kolchunov V.I. The Effect of Reinforced Concrete for Crack Resistance and Rigidity Based on Mechanics of Fracture Under Bending // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Volume 287. Pp. 79 -97. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12703-8_9.
16. Kolchunov V.I. Modeling of Reinforced Concrete in the “LIRA” Intelligence for the Problem of Crack Opening // Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. Volume 372. Pp. 291 – 313. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36723-6_29.
17. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending // Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15. Issue 3. article 456. Pp. 375–380. doi:10.5937/jaes15-14663.
18. Iakovenko I., Kolchunov V.I. (2017). The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states // Journal of Applied Engineering Science. 2017. Vol. 15. Iss. 3. article 455. Pp. 366–375. doi:10.5937/jaes15-14662
19. Kolchunov V.I. Generalized Deplanation Hypotheses for Linear and Angular Deformations in Reinforced Concrete Structures under Combined Torsion and Bending // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2023. (1(59)). Pp. 9-26. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.69.1.001>.
20. Колчунов В. И. Некоторые проблемные задачи современной теории железобетона и их решения // Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук. – Москва: Издательство АСВ, 2022. – С. 130-141.
21. Колчунов Вл. И. Метод расчетных моделей сопротивления для железобетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. т.19, №3. С.261-275. <https://doi.org/10.22363/1815-5235/>
22. Колчунов Вл. И., Карпенко С. Н. Жесткость железобетонных конструкций при сложном сопротивлении // Научный журнал строительство и архитектуры. 2022. №1(65). С. 11–24. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.65.1.001>.

23. Колчунов В.И., Масуд Нур Эддин. Анализ деформаций бетона на берегах трещины вдоль оси растянутой арматуры железобетонных элементов // Вестник центрального регионального отделения РААСН. – 2006. – №5. – С. 69–72.
24. Фам Фук Тунг. Методика определения расстояния между трещинами центрально растянутых железобетонных конструкций // Известия Орловского государственного технического университета. 2006. №3. С. 55 – 64.
25. Колчунов В.И., Никулин А.И., Обернихин Д.В. Ширина раскрытия трещин железобетонных конструкций трапециевидного поперечного сечения с учетом новых эффектов сопротивления // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 10. – С. 64-73.
26. Ключева Н.В., Яковенко И.А., Усенко Н.В. К расчету ширины раскрытия наклонных трещин третьего типа в составных железобетонных конструкциях // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – №1. – С. 37–40.
27. Dem'yanov, A.I., Yakovenko, I.A., Kolchunov, V.I. The development of universal short dual-console element for resistance of reinforced concrete structures under the action torsion with bending // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennost'.* 2017. 370(4). Pp. 246–251.
29. Thomas F. G. Cracking in reinforced concrete // *The Structural Engineer.* 1936. 14. С.298–320.
30. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: Изд-во АСВ, 2004. 472 с.
31. Гольшев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. Киев: Основа, 2009.
32. Adishchev V.V., Maltsev V.V. "Investigation of stress-strain state in the beam with preformed cracks // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2018. Vol. 456. No. 1.
33. Федоров В.С., Фам Фук Тунг, Колчунов В.И. Расчет ширины раскрытия трещин в железобетонных конструкциях при центральном растяжении с учетом эффекта нарушения сплошности. // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. № 1(13). С.29-33.
34. Мурашев В.И. Трещиностойчивость, жесткость и прочность железобетона [Текст]: (основы сопротивления железобетона). Москва : Изд-во М-ва стр-ва предприятий машиностроения, 1950. - 267 с.
35. Колчунов В.И., Пимочкин В. Н. Методика экспериментальных исследований сопротивления растянутого бетона между трещинами в железобетонных конструкциях для уточнения параметра // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. 2007. №. 2-14. С. 56-60.

REFERENCES

- 1 ACI Committee 318. (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Farmington Hills, Mich: American Concrete Institute.
2. CEN (Comit'ee Europ'een de Normalisation). Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings, EN 1992-1-1:2004. CEN, Brussels, 2004
3. CEB (Comit'ee Euro-International du Beton). CEB-FIP Model Code 2010: Model Code for concrete structures. Ernst & Sohn, Wiley, Berlin, Germany, 2013. 434 p.
4. SP 5.03.01-2020. Concrete and reinforced concrete structures. Concrete and reinforced concrete structures. Minsk. 2020, 236 pp. (in Russ.)
5. SP 63.13330.2018 "Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions". (With change No.1 and Change No.2). М.: FGBU "RST", 2022. (in Russ.)
6. SP 311.1325800.2017 "Concrete and reinforced concrete structures of high-strength concrete. Design rules". (With Modification No.1). М.: FGBU "RST", 2023.
7. Romashko V., Romashko-Maistruk O. Level formation and disclosure of normal cracks in reinforced concrete elements and structures. *Procedia Structural Integrity.* 2022. 36. Pp. 159–165.
8. Froch R. J. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete. *ACI Structural Journal.* 1999. 96(3). Pp. 437–442.
9. Dey A., Valiukas D., Jakubovskis R., Sokolov A., Kaklauskas G. Experimental and Numerical Investigation of Bond-Slip Behavior of High-Strength Reinforced Concrete at Service Load. *Materials.* 2022. 15. 293. <https://doi.org/10.3390/ma15010293>
10. Bado M. F., Casas J. R., Kaklauskas G. Distributed Sensing (DOFS) in Reinforced Concrete members for reinforcement strain monitoring, crack detection and bond-slip calculation. *Engineering Structures.* 2021. 226. 111385. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111385>
11. Schmidt M., Schmidt P., Wanka S., Classen M. Shear Response of Members without Shear Reinforcement—Experiments and Analysis Using Shear Crack Propagation Theory (SCPT). *Appl. Sci.* 2021. 11. 3078. <https://doi.org/10.3390/app11073078>.

12. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Konorev A.V. Main results of experimental studies of reinforced concrete structures made of high-strength concrete B100 of circular and circular cross-sections under torsion with bending. *Stroitel'naya mekhanika of engineering structures and constructions*. 2019. No. 1. Pp. 51-61. (in Russ.)
13. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of reinforced concrete beams made of high-strength concrete and fiber concrete. *Magazine of civil engineering*. 2018. No. 1(77). Pp. 90-100.
14. Alhashimi Omar Ismael Mohammed. Experimental Studies of Strength Inclined Sections Bent Elements from Autoclaved Aerated Concrete. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1079. 022062.
15. Kolchunov V.I. The Effect of Reinforced Concrete for Crack Resistance and Rigidity Based on Mechanics of Fracture Under Bending. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023. Volume 287. Pp. 79 -97. https://doi.org/10.1007/978-3-031-12703-8_9
16. Kolchunov V.I. Modeling of Reinforced Concrete in the “LIRA” Intelligence for the Problem of Crack Opening. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024. Volume 372. Pp. 291 – 313. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36723-6_29.
17. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15. Issue 3. article 456. Pp. 375–380. doi:10.5937/jaes15-14663.
18. Yakovenko I., Kolchunov V.I. (2017). The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15. Iss. 3. article 455. Pp. 366–375. doi:10.5937/jaes15-14662
19. Kolchunov V.I. Generalized Deplanation Hypotheses for Linear and Angular Deformations in Reinforced Concrete Structures under Combined Torsion and Bending. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023. (1(59)). Pp. 9-26. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.69.1.001>.
20. Kolchunov V. I. Some problem tasks of the modern theory of reinforced concrete and their solutions. Collection of scientific papers of RAASN. Russian Academy of Architecture and Building Sciences. - Moscow: ASV Publishing House, 2022. - Pp. 130-141. (in Russ.)
21. Kolchunov V. I. Method of Resistance Design Models for Reinforced Concrete. *Stroitel'naya Mekhanika Engineering Designs and Structures*. 2023. Vol. 19. No. 3. Pp. 261-275. [https://doi.org/10.22363/1815-5235.\(in Russ.\)](https://doi.org/10.22363/1815-5235.(in Russ.))
22. Kolchunov V. I.; Karpenko S. N. Stiffness of reinforced concrete structures under complex resistance / V. I. Kolchunov, S. N. Karpenko. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2022. No. 1(65). Pp. 11-24. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.65.1.001>. (in Russ.)
23. Kolchunov V.I., Masud Nur Eddin. Analysis of Concrete Deformations at Crack Shores along the Axis of Stretched Armature of Reinforced Concrete Elements. *Bulletin of the Central Regional Branch of RAASN*. 2006. No. 5. Pp. 69-72. (in Russ.)
24. Pham Phuc Tung. Methodology of determination of distance between cracks of centrally stretched reinforced concrete structures. *Izvestiya Orel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta*. 2006. No. 3. Pp. 55 - 64. (in Russ.)
25. Kolchunov V.I., Nikulin A.I., Obernikhin D.V. Crack Opening Width of Reinforced Concrete Structures of Trapezoidal Cross-Section Taking into Account New Resistance Effects. *Vestnik of V.G. Shukhov State Technical University* - 2018.- No. 10.- P. 64-73. (in Russ.)
26. Klyueva N.V., Yakovenko I.A., Usenko N.V. To calculation of the opening width of inclined cracks of the third type in composite reinforced concrete structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2014. No. 1. Pp. 37-40. (in Russ.)
27. Dem'yanov, A.I., Yakovenko, I.A., Kolchunov, V.I. The development of universal short dual-console element for resistance of reinforced concrete structures under the action torsion with bending. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennost'is*. 2017. 370(4). Pp. 246–251.
29. Thomas F. G. Cracking in reinforced concrete. *The Structural Engineer*. 1936. 14. Pp.298–320.
30. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Calculation Models of Force Resistance of Reinforced Concrete. Moscow: ASV Publishing House, 2004. 472 p. (in Russ.)
31. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Resistance of reinforced concrete. Kiev: Osnova, 2009. (in Russ.)
32. Adishchev V.V., Maltsev V.V. Investigation of stress-strain state in the beam with preformed cracks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456. No. 1.
33. Fedorov V.S., Pham Phuc Tung, Kolchunov V.I. Calculation of Crack Opening Width in Reinforced Concrete Structures under Central Tension with Account of Continuity Violation Effect. *Izvestiya Orel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Series: Construction and transportation*. 2017. No. 1(13). Pp.29-33. (in Russ.)
34. Murashev V.I. Crack resistance, rigidity and strength of reinforced concrete [Text]: (basics of resistance of reinforced concrete). - Moscow : Publ. Ministry of construction f machine-building enterprises, 1950. - 267 p. (in Russ.)
35. Kolchunov V. I., Pimochkin V.N. Methodology of experimental studies of the resistance of stretched concrete between cracks in reinforced concrete structures to clarify the parameter. *Izvestiya Orel'skogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Series: Construction and transportation*. - 2007. No. 2-14. Pp. 56-60. (in Russ.)

Информация об авторах

Колчунов Владимир Иванович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,

Член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инженерной графики и компьютерного моделирования.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия

Главный научный сотрудник

E-mail: vlik52@mail.ru

Федоров Сергей Сергеевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой инженерной графики и компьютерного моделирования

E-mail: fedorovss@mgsu.ru

Information about authors

Kolchunov Vladimir Iv.

Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,

Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.

Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences", Moscow, Russia,

chief researcher

E-mail: vlik52@mail.ru

Fedorov Sergey S.

Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,

candidate of technical sciences, head of the Department of Engineering Graphics and Computer Modeling.

E-mail: fedorovss@mgsu.ru

С.Н. КРИВОШАПКО¹

¹ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов, г. Москва

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ С ПЛОСКИМ КОНТУРОМ И СУПЕРЭЛЛИПСАМИ ГЛАВНОГО КАРКАСА

Аннотация. Аналитический метод задания поверхности по сравнению с другими значительно упрощает дальнейший ход проектирования криволинейных оболочечных структур и оболочек. Пользуясь универсальностью суперэллипсов, которые составляют семейство замкнутых плоских кривых симметричных относительно двух координатных осей, можно принять их за тройку кривых главного каркаса проектируемой поверхности. В результате плоскопараллельного переноса каждого из трех суперэллипсов вдоль другого направляющего суперэллипса при условии прохождения подвижного суперэллипса через симметричные точки третьего суперэллипса главного каркаса будет получена тройка разных поверхностей с тождественным главным каркасом. Этот метод построения поверхностей получил широкое распространение во многих отраслях строительства, техники и науки. В статье описаны и проиллюстрированы двадцатью девятью рисунками практически все известные поверхности с главным каркасом из 3-х суперэллипсов. Их было обнаружено более девяти десятков. Некоторые поверхности были приняты за срединные поверхности тонких строительных оболочек, для которых определены их напряженно-деформированные состояния. Приведенные результаты и список использованной литературы из 32 наименований помогут найти новые направления в исследовании поверхностей и оболочек этого типа, которые обладают определенными достоинствами.

Ключевые слова: суперэллипс, главный каркас поверхности, плоскопараллельный перенос кривой, формирование поверхности, ромб, окружность, цилиндроид, алгебраическая поверхность.

S.N. KRIVOSHAPKO¹

¹The Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia

ANALYTICAL SURFACES WITH A PLANE CONTOUR AND WITH SUPERELLIPSES OF THE MAIN FRAMEWORK

Abstract. Analytical method of definition of surface considerably simplifies the following operation of design of curvilinear shell structures and shells in comparison with other methods of definition. Having used the universality of superellipses which form the family of close plane curves that are symmetrical relatively two coordinate axes, one can assume them as a three of curves of the main frame of a design surface. The three of different surfaces with identical main framework will be obtained as a result of plane-and-parallel translation of every of three superellipses along another director ellipse under condition of going of the mobile superellipse through symmetrical points of the third superellipse of the main framework. This method of formation of the surfaces gained wide distribution in many branches of building, technics, and science. In a paper, all known surfaces with main frames of three superellipses are described and illustrated by twenty-nine figures. More than nine tens of them were brought out. Some surfaces were taken as middle surfaces of thin building shells. Their stress-strain state was determined by FEM. The presented results and a list of references containing 32 names will help to find new directions in research of surfaces and shells of this type that have some advantages.

Key words: superellipse, main framework of surface, plane-and-parallel translation of a curve, surface design, rhombus, circle, cylindroid, algebraical surface.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Weisstein E.W. Superellipse. From MathWorld - A Wolfram Web Resource. <https://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html>
2. Hein P. Piet Heine, 2021. <https://piethein.com/piet-hein/>
3. Flanagan D. L., Hefner O. V. Surface molding - New tool for the engineer (Man-Computer Graphics/MCG/ allows operator control through oscilloscope via light sensitive pen) // *Astronautics and Aeronautics*. 1967. 4, pp. 58-62.
4. Gardner M. The superellipse: a curve that lies between the ellipse and the rectangle // *Scientific American*. 1965. 21. Pp. 222-234.
5. Barr A. Superquadrics and angle-preserving transformations // *IEEE Computer Graphics Applications* 1. 1981. Pp.11-23.
6. Bar M., Neta M. Humans prefer curved visual objects // *Psychological Science*. 2006. 17(8), Pp. 645-648.
7. Talu S. D. L. Complex 3D shapes with superellipsoids, supertoroids and convex polyhedrons // *Journal of Engineering Studies and Research*. 2011. Vol. 17, no. 4, pp. 96-100.
8. Xiaoming Zhang, Paul L. Rosin. Superellipse fitting to partial data // *Pattern Recognition (Computer Science)*. 2003. 36. No 3. Pp. 743-752
9. Kadir can Erbaş. Surface Area of Superellipsoids and its Application to Physics Problems: Chapter 3. In book: *New-Applications-In-Basic-Sciences*. September 2022. Publisher: Iksad Publishing House. Baskent University, Ankara, Turkey.
10. Авдоньев Е.Я. Аналитическое описание корпусных поверхностей // *Прикладная геометрия и инженерная графика*. Киев, 1972. Вып. 15. С. 156-160.
11. Страшнов С.В. Использование суперэллипсов в компьютерном моделировании строительных и машиностроительных объектов // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)*. 2023. Том 23. С. 67-76. DOI: 10.14529/build230408
12. Lamé G. Examen de diferentes méthodes employées pour résoudre les problèmes de géometrie. M. V. Courcier imprimeur Libraire, 1818. (New Edition 2008 from Editions Gabay).
13. Кривошапко С.Н. Гидродинамические поверхности// *Судостроение*. 2021. № 3. С. 64-67 [ISSN 0039-4580].
14. Krivoshapko S.N. Tangential developable and hydrodynamic surfaces for early stage of ship shape design, *Ships and Offshore Structures*. 2023. 18:5, 660-668, DOI: 10.1080/17445302.2022.2062165
15. Karnevich V.V. Hydrodynamic surfaces with midship section in the form of the Lamé curves// *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021. 22(4): 323-328 DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328
16. Кривошапко С.Н. Алгебраические судовые поверхности с каркасом из трех плоских кривых в координатных плоскостях // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2022. Т. 23. № 3. С. 207-212 DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-3-207-212
17. Авдоньев Е.А., Протодяконов С.М. Исследование геометрии некоторых поверхностей высших порядков// *Прикладная геометрия и инженерная графика*. Киев, 1975. Вып. 20. С. 138-142.
18. Страшнов С.В. Компьютерное моделирование новых форм строительных оболочек // *Геометрия и графика*. 2022. №. 4. С. 26-34. DOI: <https://doi.org/10.12737/2308-4898-2022-10-4-26-34>
19. Gokhan Budak and Serdar Beji. Computational resistance analyses of a generic submarine hull form and its geometric variants // *The Journal of Ocean Technology*. 2016. 11(2): 77-86.
20. Mohammad M., Korol Y.M., Dalayeli H. CFD analysis on the bare hull form of submarines for minimizing the resistance // *International Journal of Maritime Technology (IJMT)*. 2015. Vol. 3 / Winter 2015: 1-16 [Available online at: http://ijmt.ir/browse.php?a_code=A -10 -450 -1&sid=1&slc_lang=en].
21. Krivoshapko S.N. Surfaces with a main framework of three given curves which include one circle // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023; 19(2): 210-219. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-2-210-219>
22. Мамиева И.А., Карневич В.В. Геометрия и статический расчет тонких оболочек с линейчатыми срединными поверхностями с главным каркасом из трех суперэллипсов // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 1(105). С. 16-27. DOI 10.33979/2073-7416-2023-105-1-16-27. – EDN LSIOLJ.
23. Gbaguidi Aisse G.L., Aleshina O.O., Mamieva I.A. Investigation of three thin shells with ruled middle surfaces with the same main frame // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024. Vol. 20. № 2. Pp. 146-158. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-146-158>
24. Мамиева И.А. Линейчатые алгебраические поверхности с главным каркасом из трех суперэллипсов // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Том 18. № 4. С. 387-395 DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-4-387-395.

25. Кривошапко С.Н. Поверхности диагонального переноса велароидального типа на ромбическом плане // Строительство и реконструкция. 2023. № 2 (106). С. 59-69. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-106-2-59-69
26. Aleshina O.O. Geometry and static analysis of thin shells in the form of a surface of diagonal translation of velaroidal type // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2023. Vol. 19. No 2. Pp. 84 – 93 DOI 10.22363/1815-5235-2023-19-1-84-93
27. Кривошапко С.Н., Алёшина О.О., Иванов В.Н. Статический расчет оболочек, очерченных по поверхностям с главным каркасом из трех заданных суперэллипсов // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 6 (305). С. 18–27. DOI: 10.37538/0039-2383.2022.6.18.27
28. Тупикова Е.М. Оболочки в форме алгебраических линейчатых поверхностей на ромбическом плане // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2023. Т. 19. № 5. С. 510–519. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-5-510-519>
29. Волков Г.Ф. Оболочка переноса отрицательной кривизны // Армоцементные конструкции в строительстве. Ленинград: Госстройиздат, 1963. С. 48 – 58.
30. Zakerdoost H., Ghassemi H., Ghiasi M. Ship hull form optimization by evolutionary algorithm in order to diminish the drag // J. Marine Sci. Appl. 2013. 12: 170-179. DOI: 10.1007/s11804-013-1182-1
31. Andrun M., Blagojević B., Bašić J. The influence of numerical parameters in the finite-volume method on the Wigley hull resistance // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part M. Journal of Engineering for the Maritime Environment. 2018. Vol 233 (4), pp. 1123-1132. 10.1177/1475090218812956
32. Страшнов С.В., Рынковская М.И. К вопросу о классификации аналитических поверхностей // Геометрия и графика. 2022. Том 10. № 1. С. 36-43 DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-1-36-43.

REFERENCES

1. Weisstein E.W. Superellipse. From MathWorld - A Wolfram Web Resource. <https://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html>
2. Hein P. “Piet Heine”, 2021 <https://piethein.com/piet-hein/>
3. Flanagan D.L., Hefner O.V. Surface molding- new tool for the engineer (Man-Computer Graphics/MCG/ allows operator control through oscilloscope via light sensitive pen). *Astronautics and Aeronautics*. 1967. 4. Pp. 58-62.
4. Gardner M. The superellipse: a curve that lies between the ellipse and the rectangle. *Scientific American*. 1965. 21. Pp. 222–234.
5. Barr A. Superquadrics and angle-preserving transformations. *IEEE Computer Graphics Applications*. 1981. 1. Pp. 11–23.
6. Bar M., Neta M. Humans prefer curved visual objects. *Psychological science*. 2006. 17(8). Pp. 645-648.
7. Talu S. D. L. Complex 3D shapes with superellipsoids, supertoroids and convex polyhedrons. *Journal of Engineering Studies and Research*. 2011. Vol. 17. no. 4. Pp. 96–100.
8. Xiaoming Zhang, Paul L. Rosin. Superellipse fitting to partial data. *Pattern Recognition (Computer Science)*. 36. No 3. 2003. Pp. 743-752
9. Kadir can Erbaş. Surface Area of Superellipsoids and its Application to Physics Problems: Chapter 3. In book: *New-Applications-In-Basic-Sciences*. September 2022. Publisher: Iksad Publishing House. Baskent University, Ankara, Turkey.
10. Avdon'ev E.Ya. Analytical description of the ship hull surfaces. *Prikladnaya Geometriya i Inzhenernaya Grafika*. 1972. Iss. 15. Pp. 156-160 (In Russ.).
11. Strashnov S.V. Utilizing superellipses in computer modeling of architectural and engineering structures. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2023. 23(4). Pp. 67–76. (in Russ.). DOI: 10.14529/build230408
12. Lamé G. Examen de différentes méthodes employées pour résoudre les problèmes de géometrie. M. V. Courcier imprimeur Libraire, 1818. (New Edition 2008 from Editions Gabay).
13. Krivoshapko S.N. Hydrodynamic surfaces. *Sudostroenie*. 2021. No 3. Pp. 64-67. (In Russ.).
14. Krivoshapko S.N. Tangential developable and hydrodynamic surfaces for early stage of ship shape design. *Ships and Offshore Structures*. 2023. 18:5. Pp. 660-668. DOI: 10.1080/17445302.2022.2062165
15. Karnevich V.V. Hydrodynamic surfaces with midship section in the form of the Lamé curves. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021. 22(4): 323-328 DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328
16. Krivoshapko S.N. Algebraic ship hull surfaces with a main frame from three plane curves in coordinate planes. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022. Vol. 23. No. 3. Pp. 207-212. doi:10.22363/2312-8143-2022-23-3-207-212. (in Russ.)
17. Avdon'ev E.Ya., Protod'yakonov S.M. Geometrical investigation of some surfaces of the highest orders. *Prikladnaya Geometriya i Inzhenernaya Grafika*. 1975. Iss. 20. Pp. 138-142.
18. Strashnov S.V. Computer simulation of new forms of shell structures. *Geometry & Graphics*. 2022. No. 4. Pp. 26-34. DOI: <https://doi.org/10.12737/2308-4898-2022-10-4-26-34>

19. Gokhan Budak and Serdar Beji. Computational resistance analyses of a generic submarine hull form and its geometric variants. *The Journal of Ocean Technology*. 2016. 11(2). Pp. 77-86.
20. Moonesun Mohammad, Yuri M. Korol, Hosein Dalayeli. CFD analysis on the bare hull form of submarines for minimizing the resistance. *International Journal of Maritime Technology (IJMT)*. 2015. Vol. 3 / Winter 2015: 1-16 [Available online at: http://ijmt.ir/browse.php?a_code=A-10-450-1&sid=1&slc_lang=en].
21. Krivoshapko S.N. Surfaces with a main framework of three given curves which include one circle. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023. 19(2). Pp. 210–219. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-2-210-219>
22. Mamieva I.A., Karnevich V.V. Geometry and static analysis of thin shells with ruled middle surfaces of three superellipses as main frame. *Building and Reconstruction*. 2023. No. 1(105). Pp. 16-27. DOI 10.33979/2073-7416-2023-105-1-16-27. – EDN LSIOLJ.
23. Gbaguidi Aisse G.L., Aleshina O.O., Mamieva I.A. Investigation of three thin shells with ruled middle surfaces with the same main frame. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024. Vol. 20. № 2. Pp. 146–158. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-146-158>
24. Iraida A. Mamieva. Ruled algebraic surfaces with a main frame from three superellipses. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. 18(4). Pp. 387-395 DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-4-387-395
25. Krivoshapko S.N. Surfaces of diagonal translation of the velaroidal type on a rhomb plan. *Building and Reconstruction*. 2023. № 2 (106). Pp. 59-69. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-106-2-59-69.
26. Aleshina O.O. Geometry and static analysis of thin shells in the form of a surface of diagonal translation of velaroidal type. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023. Vol. 19. No 2. Pp. 84 – 93. DOI 10.22363/1815-5235-2023-19-1-84-93
27. Krivoshapko S.N., Aleshina O.O., Ivanov V.N. Static analysis of shells with middle surfaces containing the main frame from three given superellipses. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. 2022. No. 6. Pp. 18-27. doi:10.37538/0039-2383.2022.6.18.27 (in Russ.)
28. Tupikova E.M. Shells in the form of algebraic ruled surfaces on a rhombic base. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2023; 19(5): 510–519 (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-5-510-519>
29. Volkov G.F. A translation shell of negative curvature. *Armotsementnie Konstruktzii v Stroitelstve*. Leningrad: GSI, 1963. Pp. 48 – 58 (In Russ.).
30. Zakerdoost H., Ghassemi H., Ghiasi M. Ship hull form optimization by evolutionary algorithm in order to diminish the drag. *J. Marine Sci. Appl.* 2013. 12: 170-179. DOI: 10.1007/s11804-013-1182-1
31. Andrun M., Blagojević B., Bašić J. The influence of numerical parameters in the finite-volume method on the Wigley hull resistance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part M. Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2018. Vol 233 (4), pp. 1123-1132. 10.1177/1475090218812956
32. Strashnov S.V., Rynkovskaya M.I. To the question of the classification for analytical surfaces. *Geometry & Graphics*. 2022. Vol. 10. No. 1. Pp. 36-43 DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-1-36-43.

Информация об авторе

Кривошапко Сергей Николаевич

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», г. Москва, Россия
Доктор технических наук, профессор. Профессор-консультант
E-mail: sn_krivoshapko@mail.ru

Information about author

Krivoshapko Sergey Nikolaevich

The Engineering Academy of the Peoples' Friendship University, Moscow, Russia,
Doctor of Tech. Sc., Professor
E-mail: sn_krivoshapko@mail.ru

V.V. LALIN¹, I.I. LALINA¹, H.H. NGO¹, T.M.D. LE²

¹Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

²University of Science and Technology - The University of Da Nang (DUT-UD), Danang, Vietnam

THE FORCE METHOD ALGORITHM IN THE FORM OF A LOOP RESULTANT METHOD

Abstract. The object of research is the behavior of statically indeterminate frames under the influence of temperature. The purpose of this work is to suggest a simple algorithm for the analysis of framed structures by using the original idea of the loop resultant method. This basic loop is generated by splitting the given structure into statically indeterminate loops instead of the conventional approach of treating the redundant forces in the whole structure. The current approach allows to simplify the calculation, thanks for using the loop compatibility conditions and by dealing with the primary unknowns for each basic loop. The advantage of this presented approach is in simple structure of a system flexibility matrix: the location of zero and non-zero blocks depend only on the numbering of loops. Different types of flexibility matrices of the element-rods are established; it is shown how to build the compatibility matrix for any loops with or without hinges; and the simple algorithm of the loop resultant method is developed. Some numerical examples are performed to describe the presented algorithm in more detail.

Keywords: force method, loop method, flexibility matrix, compatibility matrix, rod systems.

В.В. ЛАЛИН¹, И.И. ЛАЛИНА¹, Х.Х. НГО¹, Ч.М.Д. ЛЕ²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

²Университет науки и технологий – Университет Дананга (ДУТ-УД), Дананг, Вьетнам

АЛГОРИТМ МЕТОДА СИЛ В ФОРМЕ МЕТОДА КОНТУРНЫХ УСИЛИЙ

Аннотация. Объектом исследования является расчет статически неопределимых стержневых систем при температурных воздействиях. Цель данной работы - предложить простой алгоритм расчета стержневых конструкций с использованием идеи метода контурных усилий. Базовые контуры определяются путем разделения данной конструкции на статически неопределимые контуры вместо традиционного подхода к учету лишних неизвестных метода сил во всей конструкции. Предлагаемый подход позволяет упростить расчет благодаря использованию условий совместности контурных деформаций и автоматическому выбору в качестве лишних неизвестных - усилий для каждого базового контура. Преимущество представленного подхода заключается в простой структуре матрицы системы уравнений – матрицы податливости конструкции: расположение нулевых и ненулевых блоков в которой зависит только от нумерации контуров. Построены в явном виде матрицы податливости элементов-стержней для произвольной системы координат, изложен способ построения матриц совместности деформаций для произвольных контуров, разработан простой алгоритм метода контурных усилий. Приведены некоторые численные примеры для более подробного описания представленного алгоритма.

Ключевые слова: метод сил, метод контурных усилий, матрица податливости, матрица совместности, стержневые системы.

REFERENCES

1. Koohestani K. An orthogonal self-stress matrix for efficient analysis of cyclically symmetric space truss structures via force method. *International Journal of Solids and Structures*. 2011. Vol. 48. Pp. 227-233. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2010.09.023
2. Sedaghati R., Esmailzadeh E. Optimum design of structures with stress and displacement constraints using the force method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2003. Vol. 45. Pp. 1369-1389. doi: 10.1016/j.ijmesci.2003.10.001
3. Kaveh A., Rahami H. Nonlinear analysis and optimal design of structures via force method and genetic algorithm. *Computers and Structures*. 2006. Vol. 84. Pp. 770-778. doi: 10.1016/j.compstruc.2006.02.004
4. Patnaik N., Coroneos M., Hopkins A. Recent advances in the method of forces: integrated force method of structural analysis. *Advances in Engineering Software*. 1998. Vol. 29. Pp. 463-474. doi: 10.1016/S0965-9978(97)00070-7
5. Wang Y., Senatore G. Extended integrated force method for the analysis of prestress-stable statically and kinematically indeterminate structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2020. Vol. 202. Pp. 798-815. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2020.05.029
6. Kaveh A., Massoudi M.S. Recent Advances in the Finite Element Force Method. In: B.H.V. Topping and P. Iványi (eds) "Computational Methods for Engineering Technology". Saxe-Coburg Publications, Stirlingshire, UK, Chapter 12. 2014. Pp. 305-324.
7. Kaveh A. Computational Structural Analysis and Finite Element Methods. Springer International Publishing Switzerland. 2014. 432 p.
8. Singh A., Yang F., Sedaghati R. Design optimization of stiffened panels using finite element integrated force method. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 159. Pp. 99-109. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.12.040
9. Chen J.T., Chung I.L. Computation of dynamic stiffness and flexibility for arbitrarily shaped two-dimensional membranes. *Structural Engineering and Mechanics*. 2002. Vol. 13. Pp. 437-453. doi: 10.12989/sem.2002.13.4.437
10. Allahvirdizadeh R., Attarnejad R., Rashednia R., Mehdipanah A. Combining Integrated Force Method and Basic Displacement Functions to Solve Nonprismatic Beams. 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran. 2012. 8 p.
11. Jakka N. A Force based Finite Element Method with Automated identification of the Redundant Forces. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2020. Vol. 11. Pp. 904-921.
12. Peng Y., Guo Q., Zhang Z., Shan Y. Application of Base Force Element Method on Complementary Energy Principle to Rock Mechanics Problems. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. Vol. 1015. 16 p. doi: 10.1155/2015/292809
13. Kaveh A., Rahami H., Shojaei I. Swift Analysis of Civil Engineering Structures Using Graph Theory Methods. Springer Nature Switzerland AG. 2020. 302 p.
14. Meleshko V. A. Software complexes and new approaches to non-linear analysis of framed structures. *SHS Web of Conferences*. 2018. Vol. 44. 10 p. doi: 10.1051/shsconf/20184400061
15. Meleshko V.A., Rutman Y.L. Generalized Flexibility Method by the Example of Plane Elastoplastic Problem. *Procedia Structural Integrity*. 2017. Vol. 6. Pp. 140-145.
16. Biglari A., Harrison P., Bicanic N. Quasi-hinge beam element implemented within the hybrid force-based method. *Computers & Structures*. 2014. Vol. 137. Pp. 31-46. doi: 10.1016/j.compstruc.2013.10.016
17. Barham W.S., Aref A.J., Dargush G.F. Development of the large increment method for elastic perfectly plastic analysis of plane frame structures under monotonic loading. *International Journal of Solids and Structures*. 2005. Vol. 42. Pp. 6586-6609. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.06.020
18. Lalin V.V., Ngo H.H. The loop resultant method for static structural analysis. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. Vol. 18. Pp. 72-81. doi: 10.22337/2587-9618-2021-18-1-72-81

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koohestani K. An orthogonal self-stress matrix for efficient analysis of cyclically symmetric space truss structures via force method // *International Journal of Solids and Structures*. 2011. № 48. С. 227-233.
2. Sedaghati R., Esmailzadeh E. Optimum design of structures with stress and displacement constraints using the force method // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2003. № 45. С. 1369-1389.
3. Kaveh A., Rahami H. Nonlinear analysis and optimal design of structures via force method and genetic algorithm // *Computers and Structures*. 2006. № 84. С. 770-778.
4. Patnaik N., Coroneos M., Hopkins A. Recent advances in the method of forces: integrated force method of structural analysis // *Advances in Engineering Software*. 1998. № 29. С. 463-474.

5. Wang Y., Senatore G. Extended integrated force method for the analysis of prestress-stable statically and kinematically indeterminate structures // International Journal of Solids and Structures. 2020. № 202. С. 798-815.
6. Kaveh A., Massoudi M.S. Recent Advances in the Finite Element Force Method. In: B.H.V. Topping and P. Iványi (eds) "Computational Methods for Engineering Technology". Saxe-Coburg Publications, Stirlingshire, UK, Chapter 12. 2014. С. 305-324.
7. Kaveh A. Computational Structural Analysis and Finite Element Methods. Springer International Publishing Switzerland. 2014. 432 с.
8. Singh A., Yang F., Sedaghati R. Design optimization of stiffened panels using finite element integrated force method // Engineering Structures. 2018. № 159. С. 99-109.
9. Chen J.T., Chung I.L. Computation of dynamic stiffness and flexibility for arbitrarily shaped two-dimensional membranes // Structural Engineering and Mechanics. 2002. № 13. С. 437-453.
10. Allahvirdizadeh R., Attarnejad R., Rashednia R., Mehdipanah A. Combining Integrated Force Method and Basic Displacement Functions to Solve Nonprismatic Beams // 9th International Congress on Civil Engineering, Isfahan University of Technology (IUT), Isfahan, Iran. 2012. 8 с.
11. Jakka N. A Force based Finite Element Method with Automated identification of the Redundant Forces // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2020. № 11. С. 904-921.
12. Peng Y., Guo Q., Zhang Z., Shan Y. Application of Base Force Element Method on Complementary Energy Principle to Rock Mechanics Problems // Mathematical Problems in Engineering. 2014. № 1015. 16 с.
13. Kaveh A., Rahami H., Shojaei I. Swift Analysis of Civil Engineering Structures Using Graph Theory Methods. Springer Nature Switzerland AG. 2020. 302 с.
14. Meleshko V. A. Software complexes and new approaches to non-linear analysis of framed structures // SHS Web of Conferences. 2018. № 44. 10 с.
15. Meleshko V.A., Rutman Y.L. Generalized Flexibility Method by the Example of Plane Elastoplastic Problem // Procedia Structural Integrity. 2017. № 6. С. 140-145.
16. Biglari A., Harrison P., Bicanic N. Quasi-hinge beam element implemented within the hybrid force-based method // Computers & Structures. 2014. № 137. С. 31-46.
17. Barham W.S., Aref A.J., Dargush G.F. Development of the large increment method for elastic perfectly plastic analysis of plane frame structures under monotonic loading // International Journal of Solids and Structures. 2005. № 42. С. 6586-6609.
18. Lalin V.V., Ngo H.H. The loop resultant method for static structural analysis // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. № 18. С. 72-81.

Information about the authors

Vladimir Vladimirovich L.

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
doctor of technical sciences, professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction of the Institute of Civil Engineering
E-mail: vllalin@yandex.ru

Irina Igorevna L.

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
senior lecturer of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction of the Institute of Civil Engineering
E-mail: i.lalina@yandex.ru

Huu Hieu N.

Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
post-graduate student of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction of the Institute of Civil Engineering
E-mail: hieupolytech1993@gmail.com

Tran Minh Dat L.

University of Science and Technology - The University of Da Nang (DUT-UD), Danang, Vietnam
PhD of the department of Hydraulic Structures Construction
E-mail: ltmdat@dut.udn.vn

Информация об авторах

Лалин Владимир Владимирович

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
д-р техн. наук, проф. Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства

Е-mail: vllalin@yandex.ru

Лалина Ирина Игоревна

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
старший преподаватель Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства

Е-mail: i.lalina@yandex.ru

Нго Хыу Хиеу

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
аспирант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства

Е-mail: hieupolytech1993@gmail.com

Ле Чан Минь Дат

Университет науки и технологий – Университет Дананга (ДУТ-УД), Дананг, Вьетнам
канд. техн. наук кафедры строительства гидротехнических сооружений

Е-mail: ltmdat@dut.udn.vn

М.Ю. ТРОШИН¹, А.В. ТУРКОВ¹

¹Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия

ВЗАИМОСВЯЗЬ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛИТЕ ИЗ ДПК ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ВЕЛИЧИНЕ ЗАЗОРОВ В ПОПЕРЕЧНОМ СЛОЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Аннотация. Древесина перекрестноклееная (ДПК) является современным многослойным материалом с высокой несущей способностью, которая позволяет возводить многоэтажные здания из деревянных конструкций. В настоящем исследовании была изучена взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний в 3-х слойной плите из ДПК при переменной величине зазоров в среднем поперечном слое при разных граничных условиях. Исследование выполнено численными методами в вычислительном комплексе SCAD++ методом конечных элементов (МКЭ). Результатом исследования является проверка фундаментальной закономерности для плиты из ДПК с изменяемой величиной зазоров в центральном слое. Данный результат вносит вклад в развитие вибрационного метода контроля качества строительных конструкций с применением плит из ДПК с аналогичными параметрами и количеством слоев.

Ключевые слова: деревянные конструкции, древесина перекрестноклееная, максимальный прогиб, частота собственных колебаний, составная пластина.

M.YU. TROSHIN¹, A.V. TURKOV¹

¹Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol, Russia

RELATIONSHIP OF MAXIMUM DEFLECTIONS AND NATURAL FREQUENCIES VIBRATIONS IN A THREE-LAYER CLT PANEL WITH VARIABLE GAPS IN THE TRANSVERSE LAYER UNDER DIFFERENT BOUNDARY CONDITIONS

Abstract. Cross-laminated timber (CLT) is a modern multilayer material with high load-bearing capacity, which allows the construction of multi-storey buildings made of wooden structures. In the present study, the relationship between the maximum deflection and natural vibration frequency in a 3-layer CLT panel at variable values of gaps in the central transverse layer under different boundary conditions was investigated. The study has been carried out by numerical methods in the SCAD++ computer complex using the finite element method (FEM). The result of the study is the verification of the identified fundamental regularity for a CLT panel with variable gaps in the central layer. This result contributes to the development of a vibration method for quality control of building structures using CLT with similar parameters and number of layers.

Keywords: timber structures, cross-laminated timber, CLT panels, natural frequency, composite plate, dynamic control.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 56706-2022. Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия.
2. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978. 224 с.
3. Современные строительные материалы из древесины // URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=5080> (дата обращения: 14.05.2024).
4. Коробко В.И. Об одной "замечательной" закономерности в теории упругих пластинок // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1989. № 11. С. 32-36.
5. Коробко В.И., Бояркина О.В. Взаимосвязь задач поперечного изгиба и свободных колебаний треугольных пластинок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2007. № 22 (94). С. 24-26.
6. Турков А. В., Марфин К.В., Баженова А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний составных многослойных квадратных изотропных пластин с шарнирным опиранием по контуру при изменении жесткости связей сдвига//Строительство и реконструкция. 2019. №4. С. 65-70.
7. Марфин К. В. Взаимосвязь максимальных прогибов и собственных частот поперечных колебаний составных пластин на податливых связях : автореф. дисс. ... канд. тех. наук : 05.23.17 / Марфин Кирилл Васильевич. — Орел, 2015, 20 с.
8. Турков А. В., Марфин К.В., Ветрова О.А. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных ферм на квадратном плане с различными схемами опирания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. №11. С. 42-45.
9. Ржаницын А.Р. Составные стержни и пластинки. – Москва: Стройиздат, 1986. – 316 с.
10. Филатов В.В. Развитие теории и разработка численной методики расчета составных стержней и пластин. – дисс. ... докт. тех. наук : 05.23.17 / Филатов Владимир Владимирович. – Москва, 2015, 292 с.
11. Филатов В.В. К расчету составных пластин по теории А.Р. Ржаницына. // Труды международной научно-технической конф. «Вычислительная механика деформируемого твердого тела». М.: МИИТ, 2006. Том 2. С. 414-416.
12. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной / М.Ю. Трошин, А.В. Турков. // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: VII Международная научно-практическая конференция, приуроченная к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий 24-25 ноября 2022 года – Омск, 2022 – С.515-519.
13. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной // Строительство и реконструкция. 2023;(3):35-41. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41>.
14. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, смоделированной как составная пластина / М.Ю. Трошин, А.В. Турков. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-25-32 // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3. – С. 25-32.
15. Трошин М.Ю., Турков А.В., Заев А.В. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, жестко защемленной с двух сторон // Строительство и реконструкция. 2024;(2):50-58. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-112-2-50-58> .
16. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.

REFERENCES

1. GOST R 56706-2022. Plity iz perekrestnokleenoj drevesiny. Obshchie tekhnicheskie usloviya. [Cross-laminated wood boards. General technical conditions.] (rus)
2. Ashkenazi E.K. Anizotropiya drevesiny i drevesnyh materialov [Anisotropy of wood and wood materials]. M.: 'Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1978. 224 p. (rus)
3. Sovremennye stroitel'nye materialy iz drevesiny [Modern wood building materials] // URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=5080> (date of application: 14.05.2024). (rus)
4. Korobko, V.I. Ob odnoy "zamechatel'noy" zakonomernosti v teorii uprugikh plastinok [One "remarkable" regularity in the theory of elastic plates]. *Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1989. No 11. Pp. 32-36. (rus)
5. Korobko, V.I., Boyarkina, O.V. Vzaimosvyaz' zadach poperechnogo izgiba i svobodnykh kolebaniy tre-ugol'nykh plastinok [The relationship between the problems of transverse bending and free vibrations of triangular

plates]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2007. No 22 (94). Pp. 24-26. (rus)

6. Turkov A. V., Marfin K.V., Bazhenova A.V. Progiby i chastoty sobstvennykh kolebaniy sostavnykh mnogoslojnykh kvadratnykh izotropnykh plastin s sharnirnym opiraniem po konturu pri izmenenii zhestkosti svyazey sdviga [Deflections and frequencies of natural vibrations of composite multilayer square isotropic plates with articulated support along the contour under changing stiffness of shear bonds]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2019. No. 4. Pp. 65-70 (rus)

7. Marfin K. V. Vzaimosvyaz' maksimal'nykh progibov i sobstvennykh chastot poperechnykh kolebaniy sostavnykh plastin na podatlivykh svyazyah [Relationship between maximum deflections and natural frequencies of transverse vibrations of composite plates on pliable bonds]: avtoref. diss. ... kand. tekh. nauk : 05.23.17 / Marfin Kirill Vasil'evich. — Orel, 2015, 20 p. (rus)

8. Turkov A.V, Marfin K.V., Vetrova O.A. Progiby i chastoty sobstvennykh kolebaniy sistem perekrestnykh ferm na kvadratnom plane s razlichnymi skhemami opiraniya [Deflections and frequencies of natural vibrations of cross truss systems on a square plan with different support schemes]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2018. №11. Pp. 42-45. (rus)

9. Rzhanytsyn, A.R. Sostavnyye sterzhni i plastinki [Compound rods and plates]. Moscow: *Stroyizdat*, 1986. 316 p. (rus)

10. Filatov V.V. Razvitie teorii i razrabotka chislennoj metodiki rascheta sostavnykh sterzhnej i plastin [Theory development and development of numerical methods for the calculation of composite rods and plates]. – diss. ... dokt. tekh. nauk : 05.23.17 / Filatov Vladimir Vladimirovich. – Moskva, 2015, 292 p. (rus)

11. Filatov V.V. K raschetu sostavnykh plastin po teorii A.R.Rzhanytsyna [Calculation of composite plates according to the theory of A.R.Zhanitsyn]. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konf. "Vychislitel'naya mekhanika deformiruyemogo tverdogo tela" [Proceedings of the international scientific and technical conf. "Computational mechanics of a deformable solid"]. Moscow: MIIT, 2006. Vol. 2. Pp. 414-416. (rus)

12. Turkov A. V., Troshin, M. Y. The effect of the step of transverse layers on the deformability and stress distribution in three-layer slabs of cross-laminated timber. *Arkhitekturno-stroitel'nyy i dorozhno-transportnyy kompleksy: problemy, perspektivy, innovatsii. Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k provedeniyu v Rossiyskoy Federatsii Desyatiletia nauki i tekhnologii*, November, 24-25. Omsk, Siberian state automobile and highway university Publ., 2022. 515-519 pp. (rus)

13. Troshin M.Y., Turkov A.V. The effect of the step of transverse layers on the deformability and stress distribution in five-layer slabs of clt-panel. *Building and Reconstruction*. 2023. 3. Pp. 35-41. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41/>. (rus)

14. Troshin M.Yu., Turkov A.V. The effect of the lamella pitch in the transverse layer on the deformability and stress distribution in a three-layer CLT panel modeled as a composite plate. *Architecture, Construction, Transport*. 2023. (3(105)). Pp. 25-32. DOI 10.31660/2782-232X-2023-3-25-32. (rus)

15. Troshin M.Yu., Turkov A.V., ZaeV A.V. The effect of the pitch of the boards in the transverse layer on the deformability and stress distribution in a threelayer CLT panel rigidly clamped on both sides. *Building and Reconstruction*. 2024. No. 2. Pp. 50-58. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-112-2-50-58>. (rus)

16. SP 64.13330.2017. Derevyannye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNIIP II-25-80. [Wooden structures. Updated edition]. (rus)

Информация об авторах:

Трошин Михаил Юрьевич

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия, аспирант кафедры строительных конструкций и материалов.

E-mail: mtr997@mail.ru

Турков Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов.

E-mail: aturkov@bk.ru

Information about authors:

Troshin Mikhail Yr.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia, postgraduate student, of the department of Building Structures and Materials.

E-mail: mtr997@mail.ru

Turkov Andrey V.

Oryol state University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia,

doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of Building Structures and Materials.

E-mail: aturkov@bk.ru

В. В. ТУР¹, В. В. НАДОЛЬСКИЙ^{1,2}¹ УО «Брестский государственный технический университет» (БрГТУ), г. Брест, Республика Беларусь² Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ВАРИАЦИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ, МОДЕЛЕЙ

Аннотация. Надежность (безопасность) проектируемых конструкций обеспечивается использованием расчетного значения несущей способности, установленного с учетом неопределенности (изменчивости, погрешности) несущей способности. Учет неопределенности осуществляется посредством вероятностной модели, которая представляется как закон распределения с входящими в него статистическими параметрами. Наиболее важными и часто используемыми статистическими параметрами являются среднее значение и коэффициент вариации. Определение коэффициента вариации для несущей способности, вычисленной на основе численных моделей (компьютерного моделирования), является важной задачей, так как существующие классические методы не могут быть применены. По этой причине целью данной статьи является развитие и исследование точности методов определения коэффициента вариации несущей способности, вычисленной посредством компьютерного моделирования.

Предложенный метод определения коэффициента вариации основан на разложении функции в ряд Тейлора с последующим применением различных схем численного дифференцирования. Верификация выполнена на обобщенных нелинейных моделях несущей способности, для которых можно получить точное решение с помощью метода Монте-Карло. Практическая реализация предложенного метода продемонстрирована на конечно-элементных моделях. В качестве результатов выполненного исследования можно выделить собственно методы определения коэффициента вариации несущей способности, вычисленной посредством компьютерного моделирования, и значения коэффициентов вариации для обобщенных моделей несущей способности тонкостенных элементов с учетом потери местной устойчивости стенки и с последующим включением поясов балки в работу. Наиболее точно оценить значение коэффициента вариации можно с использованием разложения в ряд Тейлора и численного интегрирования по 3 точкам, однако такой метод требует $2N+1$ вычислений, поэтому он может быть рекомендован только для отдельных верификационных задач. В качестве практического метода оценки коэффициента вариации следует использовать разложение в ряд Тейлора и численное интегрирование по 2 точкам (требуется $N+1$ вычислений).

Ключевые слова: коэффициент вариации, расчетное значение, метод конечных элементов (МКЭ), численная модель, компьютерное моделирование, разложение в ряд Тейлора, численное интегрирование.

V. V. TUR¹, V. V. NADOLSKI^{1,2}¹ Brest State Technical University, Brest, Belarus² Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

METHODS FOR ESTIMATING THE COEFFICIENT OF VARIATION OF THE RESISTANCE IN THE DESIGN OF STRUCTURES BASED ON NONLINEAR FINITE ELEMENT MODELS

Abstract. The reliability (safety) of the designed structures is ensured by using the design value of the bearing capacity, taking into account the uncertainty (variability, error) of the bearing capacity. Uncertainty is taken into account by means of a probabilistic model, which is represented as a distribution law with statistical parameters included in it. The most important and frequently used statistical parameters are the mean value and coefficient of variation.

© Тур А.В., Надольский В.В., 2024

Determining the coefficient of variation for the bearing capacity calculated on the basis of numerical models (computer modeling) is an important task, since existing classical methods cannot be applied. For this reason, the purpose of this article is to develop and study the accuracy of methods for determining the coefficient of variation of the bearing capacity calculated by computer modeling. The proposed method for determining the coefficient of variation is based on the decomposition of the function into a Taylor series, followed by the use of various numerical differentiation schemes. Verification was performed on generalized nonlinear models of load-bearing capacity, for which an exact solution can be obtained using the Monte Carlo method. The practical implementation of the proposed method is demonstrated on finite element models. As the results of the performed research, it is possible to identify the actual methods for determining the coefficient of variation of the bearing capacity calculated by computer modeling, and the values of the coefficients of variation for generalized models of the bearing capacity of thin-walled elements, taking into account the loss of local stability of the web and with the subsequent inclusion of the girder flanges in the work. The value of the coefficient of variation can be most accurately estimated using Taylor series expansion and numerical integration over 3 points, however, this method requires $2N+1$ calculations, therefore it can be recommended only for individual verification tasks. As a practical method for estimating the coefficient of variation, Taylor series expansion and numerical integration by 2 points should be used ($N+1$ calculations are required).

Keywords: coefficient of variation, design value, finite element method (FEM), numerical model, computer modeling, Taylor series expansion, numerical integration.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва : Стройиздат, 1978. 239 с.
2. Болотин, В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1982. 351 с.
3. Райзер, В.Д. Развитие теории надежности и совершенствование норм проектирования // Строительная механика и расчет сооружений. 1983. № 5. С. 1-4.
4. Pichugin S., Zyma O. Method for reliability estimation of the main pipeline steelwork structure // Metal Constructions. 2014. Vol. 20. No 2. P. 77-87.
5. Пичугин С.Ф. Оценка надежности элементов стальных конструкций // Металлические конструкции. 2008. Т. 14. № 4. С. 227-236.
6. Тур В.В., Надольский В.В. Калибровка значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 1 // Строительство и реконструкция. 2016. №4 (66) С.73-84.
7. Тур В.В., Надольский В.В. Калибровка значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. Часть 2 // Строительство и реконструкция. 2016. №5 (67). С.69-75.
8. Надольский В.В. Коэффициенты надежности для нелинейных моделей несущей способности балок с гибкой стенкой // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 6. С. 852–863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863.
9. Володарский В. А. Определение параметров распределений по коэффициенту вариации // Методы менеджмента качества. 2016. № 7. С. 50-53.
10. Надольский В.В. Статистические характеристики погрешности численных моделей несущей способности для стальных элементов // Строительство и реконструкция. 2023. №3 (107). С.17-34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34».
11. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. Москва : Мир, 1969. 395 с.
12. Cervenka V. Global safety format for nonlinear calculation of reinforced concrete. // Betonund Stahlbetonbau. 2008. Vol. 103. P. 37–42.
13. Cervenka V. Global safety formats in fib Model Code 2010 for design of concrete structures. // Proceedings of the 11th Probabilistic Workshop, Brno. 2013. Corpus ID: 215762212.
14. Schlune H., Plos M. Safety Format for the non-linear analysis of Concrete Structures // Engineering Structures. 2011. Vol. 33(8). DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.05.029
15. Shlune H., Gylltoft K., Plos M. Safety format for non-linear analysis of concrete structures // Magazine of Concrete Research. 2012. Vol. 64(7). Pp. 563–74.
16. Lorenzo D., Ilario V., Mancini G. Global safety format for non-linear analysis of reinforced concrete structures // Structural Concrete. 2013. Vol. 14(1). P.29–42.

17. Sykora M., Markova J., Nadolski V. Application of Semi-Probabilistic Methods to Verification of Series System // Transactions of the VSB - Technical University of Ostrava. 2021. Vol. 21/2. pp. 80-85. Doi: 10.35181/tces-2021-0018.
18. Sykora M., Nadolski V., Novak L., Novak D., Diamantidis D. Pilot comparison of semi-probabilistic methods applied to RC structures with multiple failure modes // Proceedings of fib International Congress 2022. 2022. 10 p. DOI: 10.1002/suco.202270040.
19. Cervenka, V. Reliability – based non-linear analysis according to fib Model Code 2010 // Structures Concrete, Jurnal of fib. 2013. Vol. 14. P. 19–28.
20. CEN. prEN 1992-1-1: Eurocode 2 – Design of concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings. CEN 2021. Brussels.
21. *fib* Model Code for Concrete Structures 2020 (draft). John Wiley & Sons, Berlin, Heidelberg, draft 2021.
22. Перельмутер А. В., Тур В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. Vol. 13. P. 86-102.
23. Novák, L. On Taylor series expansion for statistical moments of functions of correlated random variables // Symmetry. 2020. Vol. 12. Paper 1379.
24. *fib* Bulletin 65, “fib Model Code 2020, draft “. 2021. URL: <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/model-code-2010-final-draft,-volume-1-detail.html>
25. Орлов А. И. Метод статистических испытаний в прикладной статистике // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 5. С. 67-79. DOI 10.26896/1028-6861-2019-85-5-67-79.
26. Лепехина Н.В., Абабий В. Д. Исследование методом Монте-Карло некоторых элементарных физико-химических процессов на поверхности // Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. № 4. С. 14-17.
27. Касьянов В.Ф., Сокова С. Д., Калинин В. М. Определение влияния случайных факторов на надежность конструкций методами математической статистики и теории вероятностей // Естественные и технические науки. 2015. № 2(80). С. 138-140.
28. JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. 2001. URL: <http://www.jcss.ethz.ch>.
29. Надольский В. В., Мартынов Ю.С. Вероятностное моделирование сопротивления стальных элементов // Вестник Полоцкого государственного университета. 2015. № 8. С. 44-49.
30. Flores R. Resistance of Transversally Stiffened Hybrid Steel Plate Girders to Concentrated Loads: Doctoral Thesis. Barcelona, Polytechnic University of Catalonia, 2009. 221 p.
31. Roberts T.M., Shahabian F. Combined Shear and Patch Loading of Plate Girders // Journal Structural Engineer ASCE. 2000. Vol. 126. № 3. P. 316-321.
32. Надольский В. В., Подымако В.И. Оценка несущей способности стальной балки методом конечных элементов при совместном действии локальных и сдвиговых усилий // Строительство и реконструкция. 2022. №2 (100) С.26-43.
33. Надольский В.В., Вихляев А.И. Оценка несущей способности балок с гофрированной стенкой методом конечных элементов при действии локальной нагрузки // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 6. С. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202.
34. Надольский В.В. Параметры численных моделей несущей способности для стальных элементов // Строительство и реконструкция. 2023. № 1(1). С. 43-56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56.

REFERENCES

1. Rzhanicyn A. R. Teoriya rascheta stroitel'nyh konstrukcij na nadezhnost'[Theory of calculation of building structures for reliability]. Moskva : Strojizdat, 1978. 239 s.
2. Bolotin, V. V. Metody teorii veroyatnostej i teorii nadezhnosti v raschetah sooruzhenij [Methods of probability theory and reliability theory in calculations of structures]. Moskva : Strojizdat, 1982. 351 s.
3. Rajzer, V.D. Razvitie teorii nadezhnosti i sovershenstvovanie norm proektirovaniya [Development of reliability theory and improvement of design standards] *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 1983. № 5. S. 1-4.
4. Pichugin S., Zyma O. Method for reliability estimation of the main pipeline steelwork structure. *Metal Constructions*. 2014. Vol. 20. No 2. P. 77-87.
5. Pichugin S.F. Ocenka nadezhnosti elementov stal'nyh konstrukcij [Assessment of reliability of elements of steel structures]. *Metallicheskie konstrukcii*. 2008. Т. 14. № 4. S. 227-236.
6. Тур В.В., Надольский В.В. Калибровка значений частных коэффициентов для проверок предельных состояний несущей способности стальных конструкций для условий Республики Беларусь. CHast' 1 [Calibration of the values of partial

coefficients for checking the limiting states of the bearing capacity of steel structures for the conditions of the Republic of Belarus. Part 1] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2016. №4 (66) S.73-84.

7. Tur V.V., Nadol'skij V.V. Kalibrovka znachenij chastnyh koefficientov dlya proverok predel'nyh sostoyanij nesushchej sposobnosti stal'nyh konstrukcij dlya uslovij Respubliki Belarus'. CHast' 2 [Calibration of the values of partial coefficients for checking the limiting states of the bearing capacity of steel structures for the conditions of the Republic of Belarus. Part 2] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2016. №5 (67). S.69-75.

8. Nadol'skij V.V. Koefficienty nadezhnosti dlya nelinejnyh modelej nesushchej sposobnosti balok s gibkoj stenkoj [Reliability coefficients for nonlinear models of load-bearing capacity of beams with a flexible wall]. *Vestnik MGSU*. 2023. T. 18. Vyp. 6. S. 852–863. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.6.852-863.

9. Volodarskij V. A. Opredelenie parametrov raspredelenij po koefficientu variacii [Determination of distribution parameters by coefficient of variation]. *Metody menedzhmenta kachestva*. 2016. № 7. S. 50-53.

10. Nadol'skij V.V. Statisticheskie karakteristiki pogreshnosti chislennyh modelej nesushchej sposobnosti dlya stal'nyh elementov [Statistical characteristics of the error of numerical models of bearing capacity for steel elements] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2023. №3 (107). S.17-34. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-107-3-17-34».

11. Han G., SHapiro S. Statisticheskie modeli v inzhenernyh zadachah [Statistical models in engineering problems] Moskva: Mir, 1969. 395 s.

12. Cervenka V. Global safety format for nonlinear calculation of reinforced concrete. *Betonund Stahlbetonbau*. 2008. Vol. 103. P. 37–42.

13. Cervenka V. Global safety formats in fib Model Code 2010 for design of concrete structures. *Proceedings of the 11th Probabilistic Workshop*, Brno. 2013. Corpus ID: 215762212.

14. Schlune H., Plos M. Safety Format for the non-linear analysis of Concrete Structures. *Engineering Structures*. 2011. Vol. 33(8). DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.05.029

15. Shlune H., Gylltoft K., Plos M. Safety format for non-linear analysis of concrete structures. *Magazine of Concrete Research*. 2012. Vol. 64(7). Pp. 563–74.

16. Lorenzo D., Ilario V., Mancini G. Global safety format for non-linear analysis of reinforced concrete structures. *Structural Concrete*. 2013. Vol. 14(1). P.29–42.

17. Sykora M., Markova J., Nadolski V. Application of Semi-Probabilistic Methods to Verification of Series System. *Transactions of the VSB - Technical University of Ostrava*. 2021. Vol. 21/2. pp. 80-85. Doi: 10.35181/tces-2021-0018.

18. Sykora M., Nadolski V., Novak L., Novak D., Diamantidis D. Pilot comparison of semi-probabilistic methods applied to RC structures with multiple failure modes. *Proceedings of fib International Congress 2022*. 2022. 10 p. DOI: 10.1002/suco.202270040.

19. Cervenka, V. Reliability – based non-linear analysis according to fib Model Code 2010. *Structures Concrete, Jurnal of fib*. 2013. Vol. 14. R. 19–28.

20. CEN. prEN 1992-1-1: Eurocode 2 – Design of concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings. CEN 2021. Brussels.

21. fib Model Code for Concrete Structures 2020 (draft). John Wiley & Sons, Berlin, Heidelberg, draft 2021.

22. Perel'muter A. V., Tur V.V. Gotovy li my perejti k nelinejnomu analizu pri proektirovanii? [Are we ready to switch to nonlinear analysis in design?]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13. P. 86-102.

23. Novák, L. On Taylor series expansion for statistical moments of functions of correlated random variables. *Symmetry*. 2020. Vol. 12. Paper 1379.

24. fib Bulletin 65, “fib Model Code 2020, draft“. 2021. URL: <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/model-code-2010-final-draft,-volume-1-detail.html>

25. Orlov A. I. Metod statisticheskikh ispytanij v prikladnoj statistike [Method of statistical tests in applied statistics] *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2019. T. 85. № 5. S. 67-79. DOI 10.26896/1028-6861-2019-85-5-67-79.

26. Lepekhina N.V., Ababij V. D. Issledovanie metodom Monte-Karlo nekotoryh elementarnykh fiziko-himicheskikh processov na poverhnosti [Monte Carlo investigation of some elementary physical and chemical processes on the surface] *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2003. T. 306. № 4. S. 14-17.

27. Kas'yanov V.F., Sokova S. D., Kalinin V. M. Opredelenie vliyaniya sluchajnykh faktorov na nadezhnost' konstrukcij metodami matematicheskoy statistiki i teorii veroyatnostej [Determination of the influence of random factors on the reliability of structures by methods of mathematical statistics and probability theory] *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2015. № 2(80). S. 138-140.

28. JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. 2001. URL: <http://www.jcss.ethz.ch>.

29. Nadol'skij V. V., Martynov YU.S. Veroyatnostnoe modelirovanie soprotivleniya stal'nyh elementov [Probabilistic modeling of resistance of steel elements] *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. № 8. S. 44-49.
30. Flores R. Resistance of Transversally Stiffened Hybrid Steel Plate Girders to Concentrated Loads : Doctoral Thesis. Barcelona, Polytechnic University of Catalonia, 2009. 221 p.
31. Roberts T.M., Shahabian F. Combined Shear and Patch Loading of Plate Girders. *Journal Structural Engineer ASCE*. 2000. Vol. 126. № 3. P. 316-321.
32. Nadol'skij V. V., Podymako V.I. Ocenka nesushchej sposobnosti stal'noj balki metodom konechnyh elementov pri sovmestnom dejstvii lokal'nyh i sdvigovyh usilij [Assessment of the bearing capacity of a steel beam by the finite element method under the combined action of local and shear forces] *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2022. №2 (100) S.26-43.
33. Nadol'skij V.V., Vihlyaev A.I. Ocenka nesushchej sposobnosti balok s gofirovannoj stenкой metodom konechnyh elementov pri dejstvii lokal'noj nagruzki [Assessment of the bearing capacity of beams with a corrugated wall by the finite element method under the action of a local load] *Vestnik MGSU*. 2022. T. 17. Вып. 6. S. 693–706. DOI: 10.22227/1997-0935.202.
34. Nadol'skij V.V. Parametry chislennyh modelej nesushchej sposobnosti dlya stal'nyh elementov [Parameters of numerical models of bearing capacity for steel elements]. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2023. № 1(1). S. 43-56. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-43-56.

Информация об авторах:

Тур Виктор Владимирович

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии бетона и строительных материалов».
E-mail: profturvic@gmail.com

Надольский Виталий Валерьевич

УО «Брестский государственный технический университет» (БрГТУ), г. Брест, Республика Беларусь,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительного производства».
и доцент кафедры «Строительных конструкций», Белорусский национальный технический университет (БНТУ), г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: nadolskiv@mail.ru

Information about authors:

Tur Viktor V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Concrete Technology and Building Materials.
E-mail: profturvic@gmail.com

Nadolski Vitali V.

Brest State Technical University, Brest, Belarus,
candidate of technical science (PhD), docent, associated professor of the department of Building constructions,
and Associate Professor of the Department of Building Structures, Belarusian National Technical University (BNTU),
Minsk, Republic of Belarus
E-mail: nadolskiv@mail.ru

Т.А. МАЦЕЕВИЧ^{1,2}, О.Г. ШКАРПОВА¹, С.Г. САИЯН^{1,2}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

²Институт 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^{1,2}, O.G. SHKARPOVA¹, S.G. SAIYAN^{1,2}

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

²Ishlinsky 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.*

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

Шкарпова Ольга Геннадьевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия,
магистр.
E-mail: olya.shkarpova@yandex.ru

Саян 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

С.Ю. САВИН¹, М.З. ШАРИПОВ¹, М.А. АМЕЛИНА¹¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ДЛИТЕЛЬНО НАГРУЖЕННЫХ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ДОГРУЖЕНИИ

Аннотация. Приводится в аналитической форме решение задачи о продольном изгибе внецентренно сжатого железобетонного элемента с эксцентриситетами приложения продольной силы в двух плоскостях при динамическом догружении с учетом начального напряженно-деформированного состояния, сформированного предшествующим длительным нагружением эксплуатационной нагрузкой. Объектом исследования являются колонны железобетонных каркасов зданий и сооружений, подверженные динамическому догружению в результате возникновения начального локального разрушения в конструктивной системе. Исследование выполняется аналитическим методом при следующих допущениях и ограничениях: до образования трещин деформирование сечений согласуется с гипотезой Бернулли; проекции деформированной оси колонны аппроксимируются синусоидами; влияние кратковременных нагрузок и их изменчивости на формирование напряженно-деформированного состояния колонны на момент наступления особой расчетной ситуации не учитывается; для нагрузки и начальных прогибов принят кусочно-линейный закон изменения во времени. В качестве модели бетона при рассматриваемом режимном нагружении используется комбинация вязкоупругой модели наследственного старения и модифицированной модели Максвелла с учетом нелинейно упругой связи напряжений и условно мгновенных деформаций. Выполнена валидация принятой модели материала на фоне экспериментальных данных. Приведено решение задачи об определении напряженно-деформированного состояния железобетонной колонны с учетом принятой модели материалов при статико-динамическом нагружении с учетом влияния ползучести.

Ключевые слова: железобетон, внецентренное сжатие, статико-динамическое нагружение, несущая способность, локальное разрушение, ползучесть.

S.Y. SAVIN¹, M.Z. SHARIPOV¹, M.A. AMELINA¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

CAPACITY OF COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENT UNDER DYNAMIC LOAD CONSIDERING EFFECT OF LONG-TERM PRELOADING

Abstract. The study provides an analytical solution to the problem of dynamic buckling of an eccentrically compressed reinforced concrete element with eccentricities of axial force in two planes. It takes into account the initial stress-strain state formed by the preceding long-term loading with a service load. The object of the study is the columns of reinforced concrete frames of buildings and structures subjected to dynamic loading as a result of the initial local failure in the structural system. The study is based on the analytical method under the following assumptions and limitations: before the formation of cracks, the strain is consistent with the Bernoulli hypothesis; the projections of the deformed axis of the column are approximated by sinusoids; the influence of short-term loads and their variability on the formation of the stress-strain state of the column at the time of a special design situation is not taken into account; a piecewise linear law of variation in time is assumed for the load and initial deflections. A combination of viscoelastic model of aging material and modified Maxwell model with consideration of nonlinear elastic relations of stresses and conventionally instantaneous strains is utilized as a model of concrete under the considered regime loading. Validation of the adopted material model on the background of experimental data is performed.

The paper presents the solution of the problem of determining the stress-strain state of a reinforced concrete column taking into account the adopted material model under static-dynamic loading considering the influence of creep.

Keywords: reinforced concrete, eccentric compression, static-dynamic loading, bearing capacity, localized failure, creep.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alshaikh I.M.H. et al. Experimental investigation of the progressive collapse of rein-forced concrete structures: An overview // Structures. 2020. Vol. 25. P. 881–900.
2. Kiakojoury F. et al. Experimental studies on the progressive collapse of building structures: A review and discussion on dynamic column removal techniques // Structures. Elsevier Ltd, 2023. Vol. 57.
3. Kiakojoury F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects // Eng Struct. Elsevier, 2020. Vol. 206, № December 2019. P. 110061.
4. Adam J.M. et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Eng Struct. Elsevier, 2018. Vol. 173, № March. P. 122–149.
5. Caredda G. et al. Learning from the progressive collapse of buildings // Developments in the Built Environment. 2023. Vol. 15. P. 100194.
6. Fedorova N.V., Savin S.YU. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review // Building and reconstruction. 2021. Vol. 95, № 3. P. 76–108.
7. Levitchich V. et al. Seismic performance capacities of old concrete // 13 th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada. 2004. P. 1–15.
8. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. Москва: Стройиздат, 1970. 271 p.
9. Гениев Г.А. Метод определения динамических пределов прочности бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. P. 18–19.
10. Nam J.W. et al. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads // International Journal of Damage Mechanics. 2009. Vol. 18, № 5. P. 461–490.
11. Yu W., Jin L., Du X. Influence of pre-static loads on dynamic compression and corresponding size effect of concrete: Mesoscale analysis // Constr Build Mater. 2021. Vol. 300. P. 124302.
12. Колчунов В.И. et al. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях [Survivability of building and structures to undesigned actions]. М.: Издательство АСВ, 2014. 208 p.
13. Цветков К.А., Баженова А.В., Безгодов И.М. Проблема построения диаграммы деформирования бетона при однократном динамическом воздействии с учетом влияния предварительных напряжений от действия статической нагрузки // Вестник МГСУ. 2012. № 7. P. 152–158.
14. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Experimental determination of the parameters of the static-dynamic deformation of concrete under loading modal // Building and reconstruction. 2020. Vol. 89, № 3. P. 72–81.
15. Savin S.Yu., Medyankin M.D., Sharipov M.Z. Deformation of Fiber Concrete Under a Single Dynamic Impact Taking into Account the Influence of Initial Stresses from the Static Load // Building and reconstruction. 2022. Vol. 99, № 1. P. 76–88.
16. Savin S.Yu., Fedorova N.V. Viscoelastic Model of Fiber Concrete under Dynamic Loading Considering the Effect of Initial Stresses // Russian Journal of Building Construction and Architecture. Voronezh State Technical University, 2024. № 2(62). P. 19–35.
17. Zhou Y. Concrete creep and thermal effects on the dynamic behavior of a concrete-filled steel tube arch bridge // Journal of Vybriengineering. 2014. Vol. 16, № 4. P. 1735–1744.
18. Тамразян А. Г. Динамическая устойчивость сжатого железобетонного элемента как вязкоупругого стержня // Вестники МГСУ. 2011. Vol. 2, № 1. P. 193–194.
19. Тамразян А.Г. Ресурс живучести - основной критерий решений высотных зданий [Survivability resource - the main criterion for the decisions of high-rise buildings] // Жилищное строительство. 2010. № 1. P. 15–18.
20. Alekseytsev A.V. et al. Bearing capacity of emergencyly loaded reinforced concrete columns with initial imperfections // Building and reconstruction. 2022. Vol. 104, № 6. P. 104–115.
21. Alekseytsev A.V. Optimal design of steel frame structures subject to level of mechanical safety // Building and reconstruction. 2020. Vol. 89, № 3. P. 51–62.
22. Gemmerling A.V. Raschet stержnevnyh sistem [Bar structural systems analysis]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 207 p.
23. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.
24. Tamrazyan A.G., Esayan S.G. Mechanics of concrete creep. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, 2012. 524 p.

25. Chen Y. et al. Research on creep behaviour of UHPC based on experiments and visco-elastic modelling // *Journal of Building Engineering*. Elsevier Ltd, 2024. Vol. 84.
26. BS EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings // British Standards Institution. 2004.
27. Lai J., Sun W. Dynamic behaviour and visco-elastic damage model of ultra-high performance cementitious composite // *Cem Concr Res*. 2009. Vol. 39, № 11. P. 1044–1051.
28. Wang L. et al. Nonlinear Viscoelastic Constitutive Relations and Nonlinear Visco-elastic Wave Propagation for Polymers at High Strain Rates. 1996.
29. Wang F.C., Zhao H.Y. Experimental investigation on blast furnace slag aggregate concrete filled double skin tubular (CFDST) stub columns under sustained loading // *Structures*. Elsevier, 2020. Vol. 27, № May. P. 352–360.

REFERENCES

1. Alshaikh I.M.H. et al. Experimental investigation of the progressive collapse of reinforced concrete structures: An overview. *Structures*. 2020. Vol. 25. P. 881–900.
2. Kiakojoury F. et al. Experimental studies on the progressive collapse of building structures: A review and discussion on dynamic column removal techniques. *Structures*. 2023. Vol. 57.
3. Kiakojoury F. et al. Progressive collapse of framed building structures: Current knowledge and future prospects. *Eng Struct*. 2020. Vol. 206, № December 2019. P. 110061.
4. Adam J.M. et al. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Eng Struct*. 2018. Vol. 173, № March. P. 122–149.
5. Caredda G. et al. Learning from the progressive collapse of buildings. *Developments in the Built Environment*. 2023. Vol. 15. P. 100194.
6. Fedorova N.V., Savin S.YU. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage - an analytical review. *Building and reconstruction*. 2021. Vol. 95, no. 3. P. 76–108.
7. Levitch V. et al. Seismic performance capacities of old concrete. 13 th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada. 2004. P. 1–15.
8. Bazhenov Yu.M. Concrete under dynamic loading. Moscow: Stroyizdat, 1970. 271 p.
9. Geniyev G.A. Method for determining dynamic strength of concrete. *Concrete and reinforced concrete*. 1998. No. 1. P. 18–19.
10. Nam J.W. et al. Analytical study of finite element models for FRP retrofitted concrete structure under blast loads. *International Journal of Damage Mechanics*. 2009. Vol. 18, № 5. P. 461–490.
11. Yu W., Jin L., Du X. Influence of pre-static loads on dynamic compression and corresponding size effect of concrete: Mesoscale analysis. *Constr Build Mater*. 2021. Vol. 300. P. 124302.
12. Kolchunov V.I. et al. Robustness of buildings and structures under accidental actions. Moscow: Publishing ASV, 2014. 208 p.
13. Tsvetkov K.A., Bazhenova S.I., Bezgodov I.M. Problem of construction of the deformation diagram for concrete under dynamic impact considering effects of static preloading. *Vestnik MGSU*. 2012. No. 7. P. 152–158.
14. Fedorova N.V., Medyankin M.D., Bushova O.B. Experimental determination of the parameters of the static-dynamic deformation of concrete under loading modal. *Building and reconstruction*. 2020. Vol. 89, № 3. P. 72–81.
15. Savin S.Yu., Medyankin M.D., Sharipov M.Z. Deformation of Fiber Concrete Under a Single Dynamic Impact Taking into Account the Influence of Initial Stresses from the Static Load. *Building and reconstruction*. 2022. Vol. 99, № 1. P. 76–88.
16. Savin S.Yu., Fedorova N.V. Viscoelastic Model of Fiber Concrete under Dynamic Loading Considering the Effect of Initial Stresses. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2024. № 2(62). P. 19–35.
17. Zhou Y. Concrete creep and thermal effects on the dynamic behavior of a concrete-filled steel tube arch bridge. *Journal of Vybroyengineering*. 2014. Vol. 16, № 4. P. 1735–1744.
18. Tamrazyan A.G. Dynamic stability of compressed reinforced concrete element as a visco-elastic rod. *Vestnik MGSU*. 2011. Vol. 2, No. 1. P. 193–194.
19. Tamrazyan A.G. Survivability resource - the main criterion for the decisions of high-rise buildings. *Zhilischnoe stroitelstvo*. 2010. No. 1. P. 15–18.
20. Alekseytsev A.V. et al. Bearing capacity of emergency loaded reinforced concrete columns with initial imperfections. *Building and reconstruction*. 2022. Vol. 104, № 6. P. 104–115.
21. Alekseytsev A.V. Optimal design of steel frame structures subject to level of mechanical safety. *Building and reconstruction*. 2020. Vol. 89, № 3. P. 51–62.
22. Gemmerling A.V. Bar structural systems analysis. Moscow: Stroyizdat, 1974. 207 p.
23. FIB Model Code 2010. CEB and FIP, 2011.

24. Tamrazyan A.G., Esayan S.G. Mechanics of concrete creep. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering, 2012. 524 p.
25. Chen Y. et al. Research on creep behaviour of UHPC based on experiments and visco-elastic modelling. *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 84.
26. BS EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings. British Standards Institution. 2004.
27. Lai J., Sun W. Dynamic behaviour and visco-elastic damage model of ultra-high performance cementitious composite. *Cem Concr Res*. 2009. Vol. 39, № 11. P. 1044–1051.
28. Wang L. et al. Nonlinear Viscoelastic Constitutive Relations and Nonlinear Visco-elastic Wave Propagation for Polymers at High Strain Rates. 1996.
29. Wang F.C., Zhao H.Y. Experimental investigation on blast furnace slag aggregate concrete filled double skin tubular (CFDST) stub columns under sustained loading. *Structures*. 2020. Vol. 27, № May. P. 352–360.

Информация об авторах

Савин Сергей Юрьевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций.
E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Шарипов Манонходжа Зарифходжаевич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций
E-mail: manonkhoja.sh@bk.ru

Амелина Маргарита Андреевна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций
E-mail: margo.dremova@mail.ru

Information about authors:

Savin Sergei Yu.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Candidate of Tech. Sc., associate professor of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures
E-mail: savinsyu@mgsu.ru

Sharipov Manonkhodja Z.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Post graduate student of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.
E-mail: manonkhoja.sh@bk.ru

Amelina Margarita A.

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Post graduate student of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.
E-mail: margo.dremova@mail.ru

Л.В. ГЛЕБУШКИНА¹, А.Е. ТОКАРЕВ¹

¹ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия

ИНФРАСТРУКТУРНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ В СОСТАВЕ АНГАРО-ЕНИСЕЙСКОГО МАКРОРЕГИОНА

***Аннотация.** В Сибири наблюдается тотальное доминирование в градообразовании железнодорожных магистралей и судоходных рек. Проблема «транспорт-расселение» рассматривается на конкретных материалах Ангаро-Енисейского макрорегиона интерзонального типа. Строительство Северо-Сибирской железной дороги создаст дополнительный ресурс для совершенствования структуры расселения Ближнего Севера на основе идеи «базовый город – вахтовый метод», сформированной в советское время. Использование таких форм пространственной организации объектов производства Нижнего Приангарья как кластеры и Среднего Приангарья как территории опережающего развития, свойственных инновационной экономике, позволит сформировать каркас расселенческой системы на основе базовых поселений, образованных из уже существующих городов.*

Предложены перспективные формы трансформации сложившейся структуры расселения Ангаро-Енисейского макрорегиона, в основе которой лежит концепция формирования интерзональных систем, предусматривающих как внешнее, так и внутреннее централизованное вахтово-экспедиционное расселение на севере Иркутской области и Красноярского края.

***Ключевые слова:** расселение; транспортная инфраструктура; интерзональные макрорегионы; пространственное развитие.*

L.V. GLEBUSHKINA¹, A.E. TOKAREV¹

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

INFRASTRUCTURAL PREREQUISITES FOR THE SPATIAL DEVELOPMENT OF THE IRKUTSK REGION AS PART OF THE ANGARA-YENISEI MACROREGION

***Abstract.** In Siberia the urban development along the railways and navigable rivers dominates totally. The problem of “transport-settlement” is considered on specific materials of the Angara-Yenisei macroregion of interzonal type. The construction of the North Siberian Railway will create an additional resource for improving the settlement structure of the Near North zone based on the idea of the “basic city - shift method”, formed in Soviet times. The use of such forms of spatial organization of the Lower Angara region production facilities as clusters and the Middle Angara region as territories of advanced development is the characteristic of the innovative economy. This peculiarity will allow forming the framework of a settlement system founded on basic settlements formed from the existing cities.*

Promising forms of transformation of the existing settlement structure of the Angara-Yenisei macroregion are proposed, which is based on the concept of forming interzonal systems providing for both external and internal centralized shift and expeditionary settlement in the north of the Irkutsk Region and the Krasnoyarsk Territory.

***Keywords:** resettlement; transport infrastructure; interzonal macroregions; spatial development.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юшкова Н.Г. Региональные системы расселения и территории с преференциальными режимами: принципы взаимодействия и развития // Строительство и реконструкция. – 2021. - №4(96) – С. 91-106. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-91-106>
2. Фаузер В.В., Лыткина Т.С., Фаузер Г.Н. Дифференциация арктических территорий по степени заселенности и экономической освоенности // Арктика: Экология и экономика. - 2017. - №4 (28). - С. 18-31.
3. Колесников А. А. Градостроительное проектирование Байкальской территории // Проект Байкал – 2019. №74. С. 138–142. URL: <https://doi.org/10.51461/pb.74.23>
4. Чебаненко Б.Б., Майсюк Е.П. Байкальский регион: пределы устойчивости. Новосибирск: Наука, 2002. – 160 с.
5. Кротов В.А., Фильшин Г.И. Проблемы комплексного развития Ангаро-Енисейского региона. Иркутск: типография №1, 1974. – 28 с.
6. Mohammed A.B., Perdana M. Rail liberalization for Indonesian railways: Learn from the experience of Germany and France. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2023. No.22. Pp. 1-9. doi.org/10.1016/j.trip.2023.100916
7. Ткаченко В.Я., Перцев В.П. Сухопутный транспорт Сибири: формирование опорной сети железных и автомобильных дорог. Новосибирск: Наука, 2003. – 312 с.
8. Гольц Г.А. Транспорт и расселение. М.: Наука, 1981. – 248 с.
9. Eckersten S., Balfors B. Exploring practices for facilitating integrated strategic land use and transport planning in the Nordic countries. *The Journal of Transport and Land Use*. 2023. Vol. 16 No. 1. Pp. 409–435. <https://dx.doi.org/10.5198/jtlu.2023.2350>
10. Перетолчина Л.В., Глебушкина Л.В., Шестаков А.В. Градостроительные предпосылки пространственного развития территории Ангаро-Енисейского макрорегиона// Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. - 2019. - №9(4) - С. 858-870. URL: <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-858-870>
11. Глебушкина Л.В., Перетолчина Л.В. Влияние структуры территориальной системы расселения интерзонального типа на развитие Ангаро-Енисейского макрорегиона// Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. - 2023. - Т.13 №2.- С. 378-397. URL: <https://elibrary.ru/qaooow>. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-378-397>
12. Duman, O., Mäntysalo, R., Granqvist, K., Johnson, E., & Ronikonmäki, N.-M. Challenges in land use and transport planning integration in Helsinki metropolitan region—A historical-institutional perspective. *Sustainability*. 2022. 14(1), 146. <https://doi.org/10.3390/su14010146>
13. Lee, J.; Arts, J.; Vanclay, F. Stakeholder views about Land Use and Transport Integration in a rapidly-growing megacity: Social outcomes and integrated planning issues in Seoul. *Sustain. Cities Soc.* 2021, 67, 102759. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102759>
14. Прокофьева Т.А., Гончаренко С.С. Строительство Северо-Сибирской магистрали – один из главных приоритетов развития транспортной системы Сибири и экономики России в целом // В Центре экономики. – 2020. – №3. – С. 5-31.
15. Плеслов А.А. Новые инфраструктурные факторы развития Иркутской области и сопредельных регионов // Российское предпринимательство. - 2018. - Том 19. № 4. - С. 965-976.
16. Безруков Л. А. Особенности территориальной хозяйственно-расселенческой структуры и перспективы пространственного развития Сибири// Наукоедение: интернет-журнал. - 2014. - № 6(25). - DOI: 10.15862/05EVN614, URL: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-6-14>
17. Благоделова О.М. Эволюция и современные тенденции развития систем расселения в районах Севера (на примере США, Канады и России)// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. - №3. – С. 5-25. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.03.01
18. Шишацкий Н.Г. Перспективы развития северных и арктических районов в рамках мегапроекта «Енисейская Сибирь» // Арктика и Север – 2018. - №33. - С. 66-90. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2018.33.66

REFERENCES

1. Yushkova N.G. Regional settlement systems and territories with preferential regimes: principles of interaction and development. *Building and reconstruction*. 2021. No.4(96) - Pp. 91-106. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-91-106>. (rus.)
2. Fauzer V.V., Lytkina T.S., Fauzer G.N. Differentiation of the Arctic territories by the degree of settlement and economic development. *Arctic: Ecology and Economics*. 2017. No.4 (28). - Pp. 18-31.(rus.)

3. Kolesnikov A. A. Urban planning design of the Baikal territory. *Project Baikal*. 2019. No.74. Pp. 138-142. URL: <https://doi.org/10.51461/pb.74.23>. (rus.)
4. Chebanenko B.B., Maisyuk E.P. Baikal region: limits of stability. Novosibirsk: Nauka, 2002. 160 p.
5. Krotov V.A., Filshin G.I. Problems of complex development of the Angara-Yenisei region. Irkutsk: printing house No.1, 1974. - 28 p.(rus.)
6. Tkachenko V.YA. Percev V.P. Suhoputnyj transport Sibiri: formirovanie opornoj seti zheleznyh i avtomobilnyh dorog. Novosibirsk: Nauka, 2003. 312 p.(rus.)
7. Golts G.A. Transport i rasselenie. M.: Nauka, 1981. 248 p.(rus.)
8. Eckersten S., Balfors B. Exploring practices for facilitating integrated strategic land use and transport planning in the Nordic countries. *The Journal of Transport and Land Use*. 2023. Vol. 16 No. 1. Pp. 409–435. <https://dx.doi.org/10.5198/jtlu.2023.2350>
9. Peretolchina L.V., Glebushkina L.V., Shestakov A.V. Gradostroitelnye predposylki prostranstvennogo razvitiya territorii Angaro-Enisejskogo makroregiona *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost*. 2019. No9(4) Pp. 858-870. URL: <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-4-858-870>.(rus.)
10. Glebushkina L.V., Peretolchina L.V. Vliyanie struktury territorialnoj sistemy rasseleniya interzonalnogo tipa na razvitie Angaro-Enisejskogo makroregiona. *Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2023. No.2.- Pp. 378-397. URL: <https://elibrary.ru/qaocw>.<https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-2-378-397>.(rus.)
11. Duman, O., Mäntysalo, R., Granqvist, K., Johnson, E., & Ronikonmäki, N.-M. Challenges in land use and transport planning integration in Helsinki metropolitan region. A historical-institutional perspective. *Sustainability*. 2022. No.14(1), p. 146. <https://doi.org/10.3390/su14010146>
12. Lee, J.; Arts, J.; Vanclay, F. Stakeholder views about Land Use and Transport Integration in a rapidly-growing megacity: Social outcomes and integrated planning issues in Seoul. *Sustain. Cities Soc.* 2021, No.67, 102759. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102759>
13. Prokofeva T.A., Goncharenko S.S. Stroitelstvo Severo-Sibirskoj magistrali – odin iz glavnyh prioritetov razvitiya transportnoj sistemy Sibiri i ekonomiki Rossii v celom. *V Centre ekonomiki*. – 2020. – No.3. – Pp. 5-31.(rus.)
14. Pleslov A.A. Novye infrastrukturnye faktory razvitiya Irkutskoj oblasti i sopredelnyh regionov. *Rossijskoe predprinimatel'stvo*. 2018. No.4. - Pp. 965-976.(rus.)
16. Bezrukov L. A. Osobennosti territorialnoj hozyajstvenno-rasselencheskoj struktury i perspektivy prostranstvennogo razvitiya Sibiri. *Science studies. Scientific journal*. 2014. Pp. 6(25). DOI: 10.15862/05EVN614, URL: <http://naukovedenie.ru/index.php?p=issue-6-14> (rus.)
17. Blagodeleva O.M. Evolyuciya i sovremennye tendencii razvitiya sistem rasseleniya v rajonah Severa (na primere SSHA, Kanady i Rossii). *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanistics*. 2017. No.3. Pp. 5-25. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.03.01.(rus.)
18. Shishatsky N.G. Prospects for the development of northern and Arctic regions within the framework of the Yenisei Siberia megaproject. *Arctic and North*. 2018. - No.33. - Pp. 66-90. DOI: 10.17238/issn2221-2698.2018.33.66

Информация об авторах:

Глебушкина Людмила Владимировна

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия,
кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций.

E-mail: glebushkinalyuda@mail.ru

Токарев Алексей Евгеньевич

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень, Россия,
доцент кафедры строительных конструкций.

E-mail: tokarevae@tyuiu.ru

Information about authors:

Glebushkina Lyudmila V.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia,
candidate of technical science, associated professor of the department of building structures.

E-mail: glebushkinalyuda@mail.ru

Tokarev Alexey E.

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia,
associated professor of the department of building structures.

E-mail: tokarevae@tyuiu.ru

К.П. ЗУБАРЕВ^{1,2,3}, Ю.А. САПРОНОВА¹, З.Р. АЛИХАНОВА¹, Ю.С. ЗОБНИНА¹, Ф.А. БУДНИК¹, В.Д. ФЕДОСЕЕВ¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

³ Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ СТЕН ЗДАНИЙ ПРИ ЗНАЧЕНИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ВЛАЖНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. В представленной работе исследовано нестационарное температурное поле в однослойной кирпичной ограждающей конструкции стены здания. Для моделирования нестационарного температурного поля стены здания было решено дифференциальное уравнение теплопроводности методом конечных разностей по явной разностной схеме с учетом краевых условий третьего рода. Приведена формула, по которой можно рассчитать значение эксплуатационной теплопроводности при известном значении эксплуатационной влажности строительного материала. Для расчетов приняты однослойные ограждающие кирпичные конструкции с толщинами оснований равными 0,12 м, 0,25 м и 0,51 м в городе Москве. Представлены результаты расчета температур в сечениях ограждающих конструкций с течением времени при значении теплопроводности, выбранном согласно нормативному документу. Также представлено время, за которое в ограждающей конструкции устанавливается стационарное температурное поле. Для кирпичных стен определено время наступления стационара при температуре наружного воздуха равной температуре наиболее холодной пятидневки.

Ключевые слова: нестационарное температурное поле, теплопроводность, дифференциальное уравнение теплопроводности, метод конечных разностей, граничные условия третьего рода

K.P. ZUBAREV^{1, 2, 3}, Y.A. SAPRONOVA¹, Z.R. ALIKHANOVA¹, Y.S. ZOBNINA¹, F.A. BUDNIK¹, V.D. FEDOSEEV¹

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

² Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

³ RUDN University, Moscow, Russia

UNSTEADY-STATE TEMPERATURE FIELD OF BUILDING WALLS USING BUILDING MATERIALS OPERATING MOISTURE VALUES

Abstract. In the presented work, the unsteady-state temperature field in the single-layer brick building wall enclosing structure was investigated. To model the nonstationary temperature field of the building wall, the differential equation of thermal conductivity was solved by the finite difference method using an explicit difference scheme, taking into account boundary conditions of the third kind. The formula using to calculate the value of operational thermal conductivity at the known value of operational moisture of building materials is given.

For the calculations, single-layer enclosing brick structures with base thicknesses of 0.12 m, 0.25 m and 0.51 m in Moscow were adopted. The results of calculating temperatures in sections of enclosing structures over time at a thermal conductivity value selected in accordance with the regulatory document are presented. The time establishing stationary temperature field is presented.

For brick walls, the time of the stationary state was determined when the outside air temperature is equal to the temperature of the coldest five-day period.

Keywords: *unsteady-state temperature field, thermal conductivity, differential equation of thermal conductivity, finite difference method, boundary conditions of the third kind*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радин В.П., Позняк Е.В., Новикова О.В. Реакция модели здания со снижением жесткости на длиннопериодные сейсмические воздействия // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2019. – № 6. – С. 124-130. – DOI 10.24160/1993-6982-2019-6-124-130.
2. Лихачев А.А., Усольцева О.А. Обзор и сравнение современных отечественных и зарубежных методов оценки технического состояния зданий и сооружений / А. А. Лихачев, // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 10(94). – С. 1-12.
3. González-Rodrigo B., Navas-Sánchez L., Rejas-Ayuga J.G., Hernández-Rubio O., Benito M.B. Preliminary Geospatial and In Situ Reconnaissance of the 8 September 2023 Moroccan Atlas Earthquake Damage // Buildings 2024. – Том. 14(3). – No. 693. <https://doi.org/10.3390/buildings14030693>
4. Huang Y., Tu R., Tuerxun W., Jia X., Zhang X., Chen X. A Community Information Model and Wind Environment Parametric Simulation System for Old Urban Area Microclimate Optimization: A Case Study of Dongshi Town, China // Buildings 2024. – Vol. 14(3). – No. 832. <https://doi.org/10.3390/buildings14030832>
5. Medinilha-Carvalho T.A., Marques da Silva F.V., Bre F., Gimenez J.M., Labaki L.C. Experimental Study of Wind Pressures on Low-Rise H-Shaped Buildings // Buildings. – 2024. – Vol. 14(3). – No. 762. <https://doi.org/10.3390/buildings14030762>
6. Karvelis A.C., Dimas A.A., Gantes C.J. Unsteady Numerical Simulation of Two-Dimensional Airflow over a Square Cross-Section at High Reynolds Numbers as a Reduced Model of Wind Actions on Buildings // Buildings. – 2024. – Vol. 14(3). – No. 561. <https://doi.org/10.3390/buildings14030561>
7. Сазонов А. К., Сухарев Г. В., Белявская О. Ш. Трехмерное моделирование температурных полей в угловых зонах наружных стен // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2023. – № 6-2(67). – С. 34-36.
8. Kokaya D., Zaborova D., Koriakovtseva T. Environmental analysis of residential exterior wall construction in temperate climate // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 8 (124). – P. 114-122. DOI 10.34910/MCE.124.10.
9. Habibi A., Kahe N. Evaluating the Role of Green Infrastructure in Microclimate and Building Energy Efficiency // Buildings. – 2024. – Vol. 14(3). – No. 825. <https://doi.org/10.3390/buildings14030825>
10. Sun W., Chen L., Suolang B., Liu K. An Investigation of the Energy-Saving Optimization Design of the Enclosure Structure in High-Altitude Office Buildings // Buildings. – 2024. – Vol. 14(3). – No. 645; <https://doi.org/10.3390/buildings14030645>
11. Лысова Е.П., Котлярова Е.В. Основы обеспечения экологической безопасности строительных материалов на всех этапах их жизненного цикла // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. – 2023. – Т. 2. – № 2. – С. 72-80. DOI 10.23947/2949-1835-2023-2-2-72-80.
12. Самарская Н.С., Котлярова Е.В., Лысова Е.П. Основные научные принципы системного подхода к определению негативных факторов, воздействующих на окружающую среду городских территорий // Безопасность техногенных и природных систем. – 2023. – Т. 7. – № 4. – С. 20-29. DOI 10.23947/2541-9129-2023-7-4-20-29.
13. Kotlyarova E. Improving the methodology for assessing the level of environmental safety of urban areas as the basis of their life cycle // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 389. – No. 09062. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338909062>
14. Лушин К.И., Войтович Е.В. Мультимодальность подхода решения задач энергоэффективности городского хозяйственного комплекса // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – № 5-6. – С. 7-17. DOI 10.34286/1995-4646-2022-86-5/6-7-17.
15. Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Import Substitution and Monitoring of Workpiece Quality // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43. – No. 8. – P. 927-933. DOI 10.3103/s1068798x23080294.
16. Минченков Н.Д., Чуракова С.К. Дифференциальное уравнение теплопроводности и конвективного теплообмена в цилиндрической системе координат // Башкирский химический журнал. – 2024. – №1 (31). – С. 96-100.

17. Nemova D., Kotov E., Andreeva D., Khorobrov S., Olshevskiy V., Vasileva I., Zaborova D., Musorina T. Experimental Study on the Thermal Performance of 3D-Printed Enclosing Structures // *Energies*. – 2022. – Vol. 15(12). – No. 4230. <https://doi.org/10.3390/en15124230>
18. Musorina T., Gamayunova O., Petrichenko M., Soloveva E. Boundary Layer of the Wall Temperature Field // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – Vol. 1116 AISC. – P. 429-437. DOI:10.1007/978-3-030-37919-3_42
19. Zaborova D.D., Kozinec G.L., Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical Model for Unsteady Flow Filtration in Homogeneous Closing Dikes // *Power Technology and Engineering*. – 2020. – Vol. 54(3) . – P. 358–364. DOI:10.1007/s10749-020-01216-9
20. Petrichenko M.R., Musorina T.A. Fractional differentiation operation in the Fourier boundary problems // *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. – 2020. – Vol. 13(2). – P. 41–52. DOI: 10.18721/JPM.13204
21. Statsenko E.A., Musorina T.A., Ostrovaia A.F., Olshevskiy V.Ya., Antuskov A.L. Moisture transport in the ventilated channel with heating by coil // *Magazine of Civil Engineering*. – 2017. – 70(2). – P. 11–17. DOI:10.18720/MCE.70.2
22. Gamayunova O., Petrichenko M., Mottaeva A. Thermotechnical calculation of enclosing structures of a standard type residential building // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1614(1). – No. 012066. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012066
23. Gamayunova O., Golov R. Potential of energy saving on transport // *E3S Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 135. – No. 02025. DOI:10.1051/e3sconf/201913502025
24. Канарейкин А.И. Распределение температуры в полом теле эллиптического сечения при граничных условиях первого и третьего рода // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2023. – № 9. – С. 10-14.
25. Белов А.В., Ильин Ю.П., Кузьмина Н.Ю., Скородумова Н.В. Решение уравнения теплопроводности для горизонтальной БГУ при внутреннем источнике тепла // *АПК России*. – 2019. – Т. 26, № 2. – С. 177-184.
26. Канарейкин А.И. Стационарное температурное поле в прямоугольной пластине с переменной теплопроводностью по одной координате // *Вестник Международной академии холода*. – 2023. – № 1. – С. 99-104. – DOI 10.17586/1606-4313-2023-22-1-99-104.
27. Канарейкин А.И. Определение температурного поля термоземента в виде пластины при нестационарном режиме // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2023. – № 4. – С. 11-16.
28. Видин Ю.В., Казаков Р.В., Злобин В.С. Процесс переноса тепла в двухслойном цилиндрическом теле // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2018. – Т. 20, № 11-12. – С. 93-98. – DOI 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-93-98.
29. Якимов Н.Д., Шагеев А.Ф., Дмитриев А.В., Бадретдинова Г.Р. Особенности расчета температурного поля в кольцевом пористом слое при бесконечном нагреве // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2023. – Т. 25. – № 6. – С. 54-66.
30. Бейбалаев В. Д., Аливердиев А. А. Исследование температурного поля в пластине одномерным нелинейным уравнением теплопроводности // *Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки*. – 2022. – Т. 37. – № 1. – С. 12-17.
31. Kubacka E., Ostrowski P., Influence of Composite Structure on Temperature Distribution—An Analysis Using the Finite Difference Method // *Materials*. – 2023. – Vol. 16. – No. 5193.
32. Saadeh R, Sedeeg A.K, Ghazal B., Gharib G. Double Formable Integral Transform for Solving Heat Equations // *Symmetry*. – 2023. – Vol. 15. – No. 218.
33. Zubarev K.P. Taking into account moisture in increasing the accuracy of calculating heat losses of a building // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2024. – Vol. 20. – No. 1. – P. 150-161. DOI:10.22337/2587-9618-2024-20-1-154-161
34. Zubarev K.P. Derivation of the equation of unsteady-state moisture behaviour in the enclosing structures of buildings using a discrete-continuous approach // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2021. – Vol. 17. – No. 4. – P. 83-90. DOI:10.22337/2587-9618-2021-17-4-83-90
35. Zubarev K.P. Using discrete-continuous approach for the solution of unsteady-state moisture transfer equation for multilayer building walls // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2021. – Vol. 17. – No. 2. – P. 50-57. DOI:10.22337/2587-9618-2021-17-2-50-57

REFERENCES

1. Radin V.P., Poznyak E.V., Novikova O.V. Reaktsiya modeli zdaniya so snizheniyem zhestkosti na dlinnoperiodnyye seysmicheskiye vozdeystviya [The dynamic response of a building model with decreasing stiffness during long-period earthquakes]. *Bulletin of Moscow energy institute. Bulletin of MEI*. 2019. No. 6. – Pp. 124-130. – DOI 10.24160/1993-6982-2019-6-124-130.(rus.)

2. Likhachev A.A., Usoltseva O.A. Obzor i sravneniye sovremennykh otechestvennykh i zarubezhnykh metodov otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya zdaniy i sooruzheniy [Review and comparison of modern domestic and foreign methods of assessing the technical condition of buildings and structures]. *Engineering bulletin of the Don*. 2022. – No. 10(94). – Pp. 1-12.
3. González-Rodrigo B., Navas-Sánchez L., Rejas-Ayuga J.G., Hernández-Rubio O., Benito M.B. Preliminary Geospatial and In Situ Reconnaissance of the 8 September 2023 Moroccan Atlas Earthquake Damage. *Buildings* 2024. Vol. 14(3). No. 693. <https://doi.org/10.3390/buildings14030693>
4. Huang Y., Tu R., Tuerxun W., Jia X., Zhang X., Chen X. A Community Information Model and Wind Environment Parametric Simulation System for Old Urban Area Microclimate Optimization: A Case Study of Dongshi Town, China. *Buildings* 2024. Vol. 14(3). –No. 832. <https://doi.org/10.3390/buildings14030832>
5. Medinilha-Carvalho T.A., Marques da Silva F.V., Bre F., Gimenez J.M., Labaki L.C. Experimental Study of Wind Pressures on Low-Rise H-Shaped Buildings. *Buildings*. 2024. Vol. 14(3). No. 762. <https://doi.org/10.3390/buildings14030762>
6. Karvelis A.C., Dimas A.A., Gantes C.J. Unsteady Numerical Simulation of Two-Dimensional Airflow over a Square Cross-Section at High Reynolds Numbers as a Reduced Model of Wind Actions on Buildings. *Buildings*. 2024. Vol. 14(3). No. 561. <https://doi.org/10.3390/buildings14030561>
7. Sazonov A.K., Sukharev G.V., Beljavskaja O.S. Trekhmernoye modelirovaniye temperaturnykh poley v uglovyykh zonakh naruzhnykh sten [Three-dimensional modeling of temperature fields in the corner zones of exterior walls] *Natural and technogenic risks. Safety of structures*. 2023. No. 6-2(67). – Pp. 34-36.(rus.)
8. Kokaya D., Zaborova D., Koriakovtseva T. Environmental analysis of residential exterior wall construction in temperate climate. *Magazine of Civil Engineering*. 2023. No. 8 (124). Pp. 114-122. DOI 10.34910/MCE.124.10.(rus.)
9. Habibi A., Kahe N. Evaluating the Role of Green Infrastructure in Microclimate and Building Energy Efficiency. *Buildings*. 2024. Vol. 14(3). No. 825. <https://doi.org/10.3390/buildings14030825>
10. Sun W., Chen L., Suolang B., Liu K. An Investigation of the Energy-Saving Optimization Design of the Enclosure Structure in High-Altitude Office Buildings. *Buildings*. 2024. Vol. 14(3). No. 645; <https://doi.org/10.3390/buildings14030645>
11. Lysova E.P., Kotlyarova E.V. Osnovy obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti stroitel'nykh materialov na vseh etapakh ikh zhiznennogo tsikla [Fundamentals of ensuring the environmental safety of building materials at all stages of their life cycle]. *Modern trends in construction, urban planning and territory planning*. 2023. Vol. 2. No. 2. – Pp. 72-80. DOI 10.23947/2949-1835-2023-2-2-72-80.(rus.)
12. Samarskaya N.S., Kotlyarova E.V., Lysova E.P. Osnovnyye nauchnyye printsipy sistemnogo podkhoda k opredeleniyu negativnykh faktorov, vozdeystviyushchikh na okruzhayushchuyu sredu gorodskikh territoriy [Main scientific principles of a systematic approach to the determination of negative factors affecting urban environment] *Safety of technogenic and natural systems*. 2023. Vol. 7. No. 4. – Pp. 20-29. DOI 10.23947/2541-9129-2023-7-4-20-29.(rus.)
13. Kotlyarova E. Improving the methodology for assessing the level of environmental safety of urban areas as the basis of their life cycle. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 389.No. 09062. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338909062>
14. Lushin K.I. Voitovich E.V. Mul'timodal'nost' podkhoda resheniya zadach energoeffektivnosti gorodskogo khozyaystvennogo kompleksa [Multimodality of the approach to solving problems of energy efficiency of the urban economic complex]. *International technical and economic journal*. 2022. – No. 5-6. – Pp. 7-17. DOI 10.34286/1995-4646-2022-86-5/6-7-17.(rus.)
15. Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Import Substitution and Monitoring of Workpiece Quality. *Russian Engineering Research*. 2023. Vol. 43. No. 8. Pp. 927-933. DOI 10.3103/s1068798x23080294.(rus.)
16. Minchenkov N.D., Churakova S.K. Differentsial'noye uravneniye teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena v tsilindricheskoy sisteme koordinat [Differential equation of thermal conductivity and convective heat transfer in a cylindrical coordinate system]. *Bashkir Chemical Journal*. 2024. No. 1 (31). Pp. 96-100.(rus.)
17. Nemova D., Kotov E., Andreeva D., Khorobrov S., Olshevskiy V., Vasileva I., Zaborova D., Musorina T. Experimental Study on the Thermal Performance of 3D-Printed Enclosing Structures. *Energies*. 2022. Vol. 15(12). No. 4230. <https://doi.org/10.3390/en15124230> (rus.)
18. Musorina T., Gamayunova O., Petrichenko M., Soloveva E. Boundary Layer of the Wall Temperature Field. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1116 AISC. Pp. 429-437. DOI:10.1007/978-3-030-37919-3_42(rus.)
19. Zaborova D.D., Kozinec G.L., Musorina T.A., Petrichenko M.R. Mathematical Model for Unsteady Flow Filtration in Homogeneous Closing Dikes. *Power Technology and Engineering*. 2020. Vol. 54(3). Pp. 358–364. DOI:10.1007/s10749-020-01216-9(rus.)
20. Petrichenko M.R., Musorina T.A. Fractional differentiation operation in the Fourier boundary problems. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics*. 2020. Vol. 13(2). Pp. 41–52. DOI: 10.18721/JPM.13204(rus.)

21. Statsenko E.A., Musorina T.A., Ostrovaia A.F., Olshevskiy V.Ya., Antuskov A.L. Moisture transport in the ventilated channel with heating by coil. *Magazine of Civil Engineering*. 2017. No.70(2).Pp. 11–17. DOI:10.18720/MCE.70.2(rus.)
22. Gamayunova O., Petrichenko M., Mottaeva A. Thermotechnical calculation of enclosing structures of a standard type residential building. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1614(1). No. 012066. DOI 10.1088/1742-6596/1614/1/012066(rus.)
23. Gamayunova O., Golov R. Potential of energy saving on transport. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 135. No. 02025. DOI:10.1051/e3sconf/201913502025
24. Kanareykin A.I. Raspredeleniye temperatury v polom tele ellipticheskogo secheniya pri granichnykh usloviyakh pervogo i tret'yego roda [Temperature distribution in a hollow body of elliptical section under boundary conditions of the first and third kind]. *Forging and stamping production. Pressure processing of materials*. – 2023. – No. 9. – P. 10-14.(rus.)
25. Belov A.V., Ilyin Yu.P., Kuzmina N.Yu., Skorodumova N.V. Resheniye uravneniya teploprovodnosti dlya gorizontальной BGU pri vnutrennem istochnike tepla [Heat equation solution for the horizontal biogas unit with an internal heat source]. *Agroindustrial complex of Russia*. 2019. Vol. 26, No. 2. Pp. 177-184.(rus.)
26. Kanareikin A.I. Statsionarnoye temperaturnoye pole v pryamougol'noy plastine s peremennoy teploprovodnost'yu po odnoy koordinate [Stationary temperature field in a rectangular plate with variable thermal conductivity in one coordinate]. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2023. No. 1. Pp. 99-104. – DOI 10.17586/1606-4313-2023-22-1-99-104.(rus.)
27. Kanareikin A.I. Opredeleniye temperaturnogo polya termoelementa v vide plastiny pri nestatsionarnom rezhime [Determination of the temperature field of a thermoelectric element in the form of a plate in the two-dimensional case in a non-stationary mode]. *Forging and stamping production. Processing of materials by pressure*. 2023. No. 4. Pp. 11-16.(rus.)
28. Vidin Yu.V., Kazakov R.V., Zlobin V.S. Protsess perenosa tepla v dvukhsloynnom tsilindricheskom tele [The process of heat transfer in a two-layer cylindrical body]. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2018. Vol. 20. No. 11-12. – Pp. 93-98. – DOI 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-93-98.
29. Yakimov N.D., Shageev A.F., Dmitriev A.V., Badretdinova G.R. Osobennosti rascheta temperaturnogo polya v kol'tsevom poristom sloye pri beskonechnom nagreve [Features of calculating the temperature field in an annular porous layer under infinite heating]. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2023. Vol. 25. No. 6. – Pp. 54-66.
30. Beibalaev V.D., Aliverdiev A.A. Issledovaniye temperaturnogo polya v plastine odnomernym nelineynym uravneniyem teploprovodnosti [Investigation of the temperature field in a plate by a one-dimensional nonlinear heat equation]. *Bulletin of Dagestan State University. Series 1: Natural Sciences*. 2022. Vol. 37. No. 1. Pp. 12-17.(rus.)
31. Kubacka E., Ostrowski P., Influence of Composite Structure on Temperature Distribution—An Analysis Using the Finite Difference Method. *Materials*. 2023. Vol. 16. No. 5193.
32. Saadeh R, Sedeeg A.K, Ghazal B., Gharib G. Double Formable Integral Transform for Solving Heat Equations. *Symmetry*. 2023. Vol. 15. No. 218.
33. Zubarev K.P. Taking into account moisture in increasing the accuracy of calculating heat losses of a building. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024. Vol. 20. No. 1. – Pp. 150-161. DOI:10.22337/2587-9618-2024-20-1-154-161(rus)
34. Zubarev K.P. Derivation of the equation of unsteady-state moisture behaviour in the enclosing structures of buildings using a discrete-continuous approach. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17. No. 4. – P. 83-90. DOI:10.22337/2587-9618-2021-17-4-83-90 (rus.)
35. Zubarev K.P. Using discrete-continuous approach for the solution of unsteady-state moisture transfer equation for multilayer building walls. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17. No. 2. Pp. 50-57. DOI:10.22337/2587-9618-2021-17-2-50-57 (rus.)

Информация об авторах:

Зубарев Кирилл Павлович

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
доцент кафедры общей и прикладной физики, преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции;
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия,
старший научный сотрудник лаборатории строительной теплофизики;
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, г. Москва, Россия,
доцент кафедры технологий строительства и конструкционных материалов,
E-mail.: zubarevkiirill93@mail.ru

Сапронова Юлия Александровна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
г. Москва, Россия,
Студент института гидротехнических и энергетических сооружений.
E-mail: ho5metown@gmail.com

Алиханова Зумруд Рамазановна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
г. Москва, Россия,
Студент института архитектуры и градостроительства.
E-mail: annarostova12@gmail.com

Зобнина Юлия Сергеевна

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
г. Москва, Россия,
студент Института промышленного и гражданского строительства/
E-mail: selma.inufo@gmail.com

Будник Фёдор Алексеевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
г. Москва, Россия,
студент Института промышленного и гражданского строительства.
E-mail: f33440508@gmail.com

Федосеев Владимир Дмитриевич

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ),
г. Москва, Россия,
студент Института инженерно-экологического строительства и механизации;
E-mail: fedosseev.vs@gmail.com

Information about authors:

Zubarev Kirill Pavlovich

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Candidate of Tech. Sc., associate professor of the department of General and Applied Physics, Lecturer in the
Department of Heat and Gas Supply and Ventilation;
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences 127238,
Moscow, Russia Moscow, Lokomotivny proezd, 21,
Senior Researcher of the Scientific Laboratory of Building Thermal Physics;
RUDN University 117198, Moscow, Russia Moscow, st. Miklouho-Maclay, 6,
Associate Professor of the Department of Construction Technology and Structural Materials, Leading Researcher of the
Scientific Center of Engineering and Construction Technologies.
E-mail.: zubarevkirill93@mail.ru

Sapronova Yulia Aleksandrovna

Moscow State University of Civil Engineering Moscow, Russia,
Student of the Institute of Hydraulic and Energy Structures.
E-mail: ho5metown@gmail.com

Alikhanova Zumrud Ramazanovna

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Student of the Institute of Architecture and Urban Planning.
E-mail: annarostova12@gmail.com

Zobnina Yulia Sergeevna

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Student of the Institute of Industrial and Civil Engineering.
E-mail: selma.inufo@gmail.com

Budnik Fedor Alekseevich

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Student of the Institute of Industrial and Civil Engineering.

E-mail: f33440508@gmail.com

Fedoseev Vladimir Dmitrievich

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,

Student of the Institute of Engineering and Ecological Construction and Mechanization.

E-mail: fedosseev.vs@gmail.com

Е.В. ТКАЧ¹, Г. ШУСЕВ², Г.М. РАХИМОВА³, М.А. РАХИМОВ³¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
г. Москва, Россия³Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, г.Караганда, Республика Казахстан

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ТЯЖЕЛЫЙ БЕТОН ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ТОННЕЛЕЙ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Аннотация. В связи с постоянно растущими требованиями к качеству и надежности бетонных конструкций, в частности для строительства тоннелей, ставится задача разработки модифицированных бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. В данном исследовании рассматриваются вопросы, связанные с модификацией состава тяжелого бетона с использованием комплексной химической добавки, включающей в своем составе суперпластификатор совместно с водорастворимой полимерной добавкой Полидон-А. Установлено, что процесс действия химической активации частиц метакрилатов изучен недостаточно, в связи с этим представленные исследования, заключающиеся в поиске решений повышения эксплуатационных характеристик за счет процесса его предварительной обработки щелочной средой $pH=10$ совместно с микроармирующим компонентом (волластонит), являются актуальными. Целью исследования было установить положительное действие процесса активации метакрилатов с комплексным модификатором совместно с микроармирующим компонентом на модифицирование структуры тяжелого бетона для повышения прочностных и гидрофизических свойств. Объектом исследования являлся модифицированный тяжелый бетон на основе активированного метакрилатов с комплексным модификатором (суперпластификатор + Полидон-А) совместно с микроармирующим компонентом для бетонных конструкций тоннелей.

Результаты исследования: Установлено положительное влияние комплексного модифицирования на свойства тяжелого бетона путем уменьшения содержания вяжущего (цемента) и замены его метакрилатом, предварительно активированным щелочной средой с $pH=10$ с модификатором и волластонитом, позволяющее повышать прочностные и гидрофизические характеристики: прочность на сжатие в возрасте 28 суток составила 68,6 МПа в сравнении с контрольным составом – 39,4 МПа; водопоглощение – 2,4%; марка по водонепроницаемости – W14, что дает возможность применять данный состав на практике для получения строительных изделий и конструкций с заданными характеристиками, эксплуатирующихся в условиях повышенной нагрузки и агрессивной среды, в частности, для конструкций тоннелей.

Ключевые слова: конструкции тоннелей, активация метакрилатов, комплексный модификатор, физико-механические свойства, гидрофизические свойства, суровые условия эксплуатации

E.V. TKACH¹, G. SHUSEV², G.M. RAKHIMOVA³, M.A. RAKHIMOV³¹National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia³Karaganda Technical University, Kazakhstan

MODIFIED HEAVY CONCRETE FOR TUNNEL STRUCTURES WITH INCREASED OPERATIONAL PROPERTIES

Abstract. The increasing demands for the quality and reliability of concrete structures, particularly in tunnel construction, necessitate the development of modified concretes with enhanced operational characteristics. This study examines the modification of heavy concrete using a complex chemical additive, comprising a superplasticizer and a water-soluble polymer additive (Polidon-A). The research reveals that the activation process of metakaolin particles is insufficiently studied. Therefore, the investigations presented here, which aim to improve operational characteristics through the pre-treatment of metakaolin in an alkaline environment (pH=10) with a micro-reinforcing component (wollastonite), are highly relevant. The study's objective is to establish the positive effect of metakaolin activation with a complex modifier and a micro-reinforcing component on the modification of heavy concrete's structure to enhance its strength and hydrophysical properties. Object: Modified heavy concrete based on activated metakaolin with a complex modifier (superplasticizer + Polidon-A) and a micro-reinforcing component for concrete tunnel structures.

Research results: The study demonstrates the positive impact of complex modification on the properties of heavy concrete. This is achieved by reducing the cement content (binder) and replacing it with metakaolin, which is pre-activated in an alkaline environment (pH=10) with a modifier and wollastonite. This allows for an increase in strength and hydrophysical characteristics: the compressive strength at 28 days was 68.6 MPa, compared to 39.4 MPa for the control mixture; water absorption was 2.4%; and the waterproofing grade was W14. This makes it possible to use this composition in practice for the production of building products and structures with specified characteristics, operating under conditions of increased load and aggressive environment, in particular, for tunnel structures.

Keywords: tunnel structures, metakaolin activation, complex modifier, physico-mechanical properties, hydrophysical properties, severe operating conditions.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орешкин Д.В. Проблемы строительного материаловедения и производства строительных материалов // Строительные материалы. – 2010. - № 11. – С. 6-8.
2. Lam T.Q.K, Do T.M.D, Ngo V.T, Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers // Magazine of civil engineering. – 2020. – № 1 (93). – С. 27-34.
3. Томилов А. П. Электрохимическая активация — новое направление прикладной электрохимии // Жизнь и безопасность. – 2002. – №3. – С. 302-307
4. Teramoto A., Maruyama I., Mitani Y. Influence of silica fume additive and temperature history on the volume change of ultra-high-strength cement paste and concrete // Advances in civil engineering materials. – 2019. – N. 3. – P. 153-172.
5. Kherraf L., Abdelouehed A., Belachia M., Hebhouh H. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes // International review of civil engineering. – 2018. – N. 1(9). – P. 31-39.
6. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Корженко А., Бурьянов А.Ф., Пудов И.А., Лушникова А.А. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками // Строительные материалы. – 2011. – №2. – С.47-51.
7. Zhao Y., Ding P., Ba C., Tang A., Song N., Liu Y., Shi L. Preparation of TiO₂ coated silicate micro-spheres for enhancing the light diffusion property of polycarbonate composites // Displays. – 2014. – V. 35. – N. 4. – P. 220-226.
8. Isaeva YU.V., Velichko E.G., Kasumov A.SH. Structure optimization of ultra-light cement mortar with due regard for geometrical and physical and mechanical characteristics of components, Construction Materials, 8, 84-87(2015) DOI: 10.31659/0585-430X-2015-728-8-84-88.
9. Yakovlev G.I., Ginuchickaya YU.N., Kizinievich O., Kizinievich V., Gordina A.F. Influence of dispersions of multilayer carbon nano-tubes on physical-mechanical characteristics and structure of building ceramics, Construction Materials. 2016. № 8. С. 20-29.
10. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235-243. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243.
11. Соловьев В.И., Ткач Е.В., Серова Р.Ф., Ткач С.А., Тоимбаева Б.М., Сейдинова Г.А. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами // Фундаментальные исследования. 2014. №8-3. С. 590-595.
12. Хозин В.Г., Красникова Н.М., Морозов И.М., Хохлаков О.В. Оптимизация состава цементного бетона для аэродромных покрытий // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – №2(28). – С.166-172.

13. Sun X., Gao Z., Cao P., Zhou C. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete // *Construction and building materials*. – 2019. – №. 202. – С. 58-72.
14. Ткач Е.В., Темирканов Р.И. Цементный бетон с улучшенными физико-механическими свойствами на основе применения активированного микрокремнезема // *Инновации и инвестиции*. 2019. №10. С. 289-292.
15. Филимонова Ю.С., Величко Е.Г. Исследование комплексной модификации тяжелого бетона // *Строительство и реконструкция*. 2021. №4 (96). С.107-109. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-107- 112.
16. Шулдяков К.В., Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Мамаев Н.А. Влияние добавки "микрокремнезем-поликарбоксилатный суперпластификатор" на гидратацию цемента, структуру и свойства цементного камня // *Цемент и его применение*. – 2013. – №2. – С. 114-118.
17. Attia K., Elrefai A., Alnahhal W., Rihan Y. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with bfrp and gfrp bars // *Composite structures*. – 2019. – N. 211. – P. 1-12.
18. Afroz M., Patnaikuni I., Venkatesan S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium // *Construction and building materials*. – 2017. – V. 154. – P.191-203.
19. Бахир В.М., Задорожный Ю.Г., Леонов Б.И., Паничева С.А., Прилуцкий В.И. Электрохимическая активация: универсальный инструмент зеленой химии. - М.: «Маркетинг Саппорт Сервисиз». – 2005. – 176 с.
20. Петрушанко И. Ю., Лобышев В. И. Физико-химические свойства водных растворов, полученных в мембранном электролизере // *Биофизика*. – 2004. – №1 (49). – С. 22 – 31.
21. Козин А.В., Федюк Р.С., Ильинский Ю.Ю., Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Мохаммад Али Мосаберпанах Влияние воластонита на механические свойства бетона // *Строительные материалы и изделия*. 2020, Том 3, №5. С. 34-42.
22. Ткач Е.В., Темирканов Р.И. Улучшение физико-механических свойства модифицированного бетона на основе применения химически активированного микрокремнезема с микроармирующим волокном // *Строительство и реконструкция*. 2020. №2 (88). С. 123-135.

REFERENCES

1. Oreshkin D.V. Problems of Building Materiology and Production of Building Materials. *Construction materials*. – 2010. no. 11. pp. 6-8.
2. Lam T.Q.K, Do T.M.D, Ngo V.T, Nguyen T.C. Increased plasticity of nano concrete with steel fibers. *Magazine of civil engineering*, 2020, vol. 93, no. 1, pp. 27-34.
3. Tomilov AP Elektrohimicheskaya aktivaciya — novoe napravlenie prikladnoj elektrohimii [Electrochemical activation - a new direction of applied electrochemistry]. *ZHizn' i bezopasnost'*, 2002, no. 3, pp. 302-307.
4. Teramoto A., Maruyama I., Mitani Y. Influence of silica fume additive and temperature history on the volume change of ultra-high-strength cement paste and concrete. *Advances in civil engineering materials*, 2019, no. 3, pp. 153-172.
5. Kherraf L., Abdelouehed A., Belachia M., Hebhoub H. Effects of the incorporation of combined additions in cement on the properties of concretes. *International review of civil engineering*, 2018, vol. 9, no. 1, pp. 31-39.
6. Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Korzhenko A., Buryanov A.F., Pudov I.A., Lushnikova A.A. Modifikaciya cementnyh betonov mnogoslojnymi uglerodnymi nanotrubkami [Modification of cement concretes with multilayer carbon nanotubes] . *Stroitel'nye materialy*, 2011, no. 2, pp. 47-51.
7. Zhao Y., Ding P., Ba C., Tang A., Song N., Liu Y., Shi L. Preparation of TIO₂ coated silicate micro-spheres for enhancing the light diffusion property of polycarbonate composites. *Displays*, 2014, vol. 35, no. 4, pp. 220-226.
8. Isaeva YU.V., Velichko E.G., Kasumov A.SH. Structure optimization of ultra-light cement mortar with due regard for geometrical and physicaland mechanical characteristics of components. *Construction Materials*, 8, 84-87(2015) DOI: 10.31659/0585-430X-2015-728-8-84-88.
9. Yakovlev G.I., Ginuchickaya YU.N., Kizinievlch O., Kizinievlch V., Gordina A.F. Influence of dispersions of multilayer carbon nano-tubes on physical-mechanical characteristics and structure of building ceramics. *Construction Materials*. 2016. no. 8. pp. 20-29.
10. Velichko E.G., SHumilina YU.S. To the problem of forming the high-strength concrete dispersed composition and properties. *Vestnik MGSU*, 15(2), 235-243(2020). DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243.
11. Soloviev V.I., Tkach E.V., Serova R.F., Tkach S.A., Toimbaeva B.M., Seydinova G.A. Research of cement stone porosity modified by complex organic mineral modifiers. *Fundamental research*. 2014, no. 8-3, pp. 590-595. In Rus.
12. Khozin V.G., Krasnikova N.M., Morozov I.M., Khokhryakov O.V. Optimization of composition of cement concrete for airfield coverings. *News of the KSUAE*, 2014, vol. 28, no. 2. pp. 166-172. In Rus.
13. Sun X., Gao Z., Cao P., Zhou C. Mechanical properties tests and multiscale numerical simulations for basalt fiber reinforced concrete. *Construction and building materials*. – 2019. – N. 202. – P. 58-72.

14. Tkach E.V., Temirkanov R.I. Cement concrete with improved physical and mechanical properties based on the use of activated silica fume. *Innovations and investments*. 2019 N. 10, 289-292.
15. Filimonova YU.S., Velichko E.G. Study of the complex modification of heavy concrete // *Construction and reconstruction*. 4 (96), 107-109(2021). DOI: 10.33979/2073-7416-2021-96-4-107-112.
16. Shuldyakov K.V., Kramar L.Ya., Trofimov B.Ya., Mamaev N.A. Influence of the polycarboxylate superplasticizer - microsilica additive on the hydration, structure and properties of cement. *Cement and its application*, 2013, no. 2, pp. 114-118. In Rus.
17. Attia K., Elrefai A., Alnahhal W., Rihan Y. Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with BFRP and GFRP bars. *Composite structures*, 2019, no. 211, pp. 1-12.
18. Afroz M., Patnaikuni I., Venkatesan S. Chemical durability and performance of modified basalt fiber in concrete medium. *Construction and building materials*, 2017, vol. 154, pp. 191-203.
19. Bakhir V.M., Zadorozhny Yu.G., Leonov B.I., Panicheva S.A., Prilutsky V.I. Elektrohimicheskaya aktivaciya: universal'nyj instrument zelenoj himii [Electrochemical activation: a versatile tool for green chemistry]. Moscow, Marketing Support Services Publ., 2005, 176 p.
20. Petrushanko I. Yu., Lobyshev V.I. Physical and chemical properties of aqueous solutions obtained in a membrane electrolyzer. *Biophysics*, 2004, vol. 49, no. 1, pp. 22 -31. In Rus.
21. Kozin A.V., Fedyuk R.S., Ilinskiy Yu.Yu., Yarusova S.B., Gordienko P.S. Mohammad Ali Mosaberpanah Effect of wollastonite on the mechanical characteristics of concrete. *Construction materials and products*. 2020, 3 (5). pp. 34-42.
22. Tkach E.V., Temirkanov R.I. Improving the physico-mechanical properties of modified concrete based on the use of chemically activated micro-silica with micro-reinforcing fiber. *Construction and reconstruction*. 2020. N. 2 (88). pp. 123-135.

Информация об авторах:

Ткач Евгения Владимировна

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Градостроительства
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Шусев Георгий

ФГБОУ ВО "Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) г. Москва, Россия,
аспирант кафедры Дорожно-строительных материалов
E-mail: shusev.madi@yandex.ru

Рахимова Галия Мухамедиевна

НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» г. Караганда, Республика Казахстан,
Кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры Строительные материалы и технологии
E-mail: g.rakhimova@kstu.rz

Рахимов Мурат Аманжолович

НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» г.Караганда, Республика Казахстан,
Кандидат технических наук, доцент кафедры Строительные материалы и технологии
E-mail: m.rakhimov@kstu.rz

Information about authors:

Tkach Evgeniya V.

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
doctor of technical sciences, professor, professor of the department urban planning.
E-mail: ev_tkach@mail.ru

Shusev Georgy A.

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia,
Postgraduate student of the Department of Road Construction Materials
E-mail: shusev.madi@yandex.ru

Rakhimova Galia M.

Non-profit joint stock company "Abylkas Saginov Karaganda Technical University» Karaganda, Republic of Kazakhstan,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials and Technology
E-mail: g.rakhimova@kstu.rz

Rakhimov Murat A.

Non-profit joint stock company "Abylkas Saginov Karaganda Technical University» Karaganda, Republic of Kazakhstan,
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials and Technologies
E-mail: m.rakhimov@kstu.rz

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Представляемый материал должен быть **оригинальным, не опубликованным ранее** в других печатных изданиях.
- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется числом знаков с учетом пробелов. Рекомендуемый объем статей: **от 15000 до 45000 знаков с пробелами**.
- Статья должна быть набрана на листах формата А4 шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.
- Статья предоставляется в электронном виде по электронной почте или через систему электронной редакции.
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Если статья возвращается автору на доработку, исправленный вариант следует прислать в редакцию повторно, приложив письмо с ответами на замечания рецензента. Доработанный вариант статьи рецензируется и рассматривается редакционной коллегией вновь. Датой представления материала считается дата поступления в редакцию окончательного варианта исправленной статьи.
- Аннотации всех публикуемых материалов, ключевые слова, информация об авторах, списки литературы будут находиться в свободном доступе на сайте соответствующего журнала и на сайте Российской научной электронной библиотеки – РУНЭБ (Российский индекс научного цитирования).

В тексте статьи не рекомендуется применять:

- обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
- для одного и того же понятия различные научные термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
- произвольные словообразования;
- сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.

Обязательные элементы:

- **заглавие (на русском и английском языке)** публикуемого материала должно быть точным и емким, слова, входящие в заглавие, должны быть ясными сами по себе, а не только в контексте; следует избегать сложных синтаксических конструкций, новых словообразований и терминов, а также слов узкопрофессионального и местного значения;
- **аннотация (на русском и английском языке)** кратко описывает объект исследования, мотивацию к проведению исследования, результаты исследования (рекомендуется указывать конкретные результаты и зависимости, полученные в исследовании), выводы (кратко); рекомендуемый объем – от 200 до 250 слов;
- **ключевые слова (на русском и английском языке)** – это текстовые метки, по которым можно найти статью при поиске и определить предметную область текста; обычно их выбирают из текста публикуемого материала, достаточно 5-10 ключевых слов.
- **список литературы**, на которую автор ссылается в тексте статьи; рекомендуемый объем списка литературы – не менее 20 источников.

В информации об авторах рекомендуется указывать ORCID, Scopus ID и SPIN-код, присвоенный в РИНЦ.

Редакция не взимает плату с авторов за подготовку, рецензирование и размещение в открытом доступе статей.

Право использования произведений предоставлено авторами на основании п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации.

Адрес издателя:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская д. 95
+7 (4862) 75-13-18

www.oreluniver.ru
E-mail: info@oreluniver.ru

Адрес редакции

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
302030, Орловская область, г. Орел, ул. Московская, 77.
+79065704999

<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>
E-mail: str_and_rek@mail.ru

Материалы статей печатаются в авторской редакции.
Право использования произведений предоставлено авторами на основании
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор М.А. Амелина
Компьютерная верстка М.А. Амелина

Подписано в печать
Дата выхода в свет
Формат 70×108/16. Печ. л. 14,6
Цена свободная. Тираж 500 экз.
Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета
на полиграфической базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95.