

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

ISSN 2073-7416

BUILDING AND RECONSTRUCTION

№1 (105) 2023

Теория инженерных сооружений.  
Строительные конструкции

The theory of engineering  
constructions. Construction  
design

Безопасность зданий  
и сооружений

Building and structure  
safety

Архитектура  
и градостроительство

Architecture  
and urban development

Строительные материалы  
и технологии

Building materials  
and technology



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)*

Редколлегия:

**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)*

**Емельянов С.Г.**, *чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, 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)*

**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)*

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

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

**Сергейчук О.В.**, *д-р техн. наук, проф. (Украина)*

**Серпик И.Н.**, *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:

**Юрова О.В.**, *(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](mailto: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](http://www.pressa-ru.ru) и [www.akc.ru](http://www.akc.ru)

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2023

## Содержание

### Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Локтионов А.П.** Обратная задача Коши для стоечно-балочной конструктивной системы ..... 3
- Мамиева И.А., Карневич В.В.** Геометрия и статический расчет тонких оболочек с линейчатыми срединными поверхностями с главным каркасом из трех суперэллипсов ..... 16
- Маринина Д.А.** Несущая способность и деформативность сварных вертикальных стыков крупнопанельных зданий на закладных деталях ..... 28
- Надольский В.В.** Параметры численных моделей несущей способности для стальных элементов ..... 43
- Тишков Н.Л., Степаненко А.Н.** Работа стальных двутавровых балок с тонкой наклонно-гофрированной стенкой ..... 57

### Безопасность зданий и сооружений

- Соловьев С.А., Иньков А.Э., Соловьева А.А.** Метод анализа надежности элементов строительных конструкций по интервальным оценкам случайных величин ..... 66
- Тур В.В., Тур А.В., Лизогуб А.А.** Экспериментальные и теоретические исследования железобетонных плоских перекрытий при удалении центральной опоры ..... 77

### Строительные материалы и технологии

- Бедов А.И., Рязанова В.А., Габитов А.И., Салов А.С., Исламгалиева Д.Р.** Вариантное проектирование фундаментов промышленных и общественных зданий для различных гидрогеологических условий ..... 104
- Бессонов И.В., Булгаков Б.И., Ланкин А.В., Говряков И.С., Горбунова Э.А.** Причины разрушения лицевого кирпича ..... 114
- Игнатъев А.А., Разговоров П.Б., Готовцев В.М.** Структурообразование и потребительские свойства гранулированных асфальтобетонных смесей с включением фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата ..... 123

*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)

**Emelyanov S.G.**, doc. sc. tech., 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)

**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)

**Sergeyчук O.V.**, doc. sc. tech., prof. (Ukraine)

**Serpik I.N.**, 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:*

**Yurova O.V.** (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](mailto: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 №ФС 77-67169 from 16.09.2016 г.

Index on the catalogue of the «Pressa Rossii»  
**86294** on the websites [www.pressa-rr.ru](http://www.pressa-rr.ru) and  
[www.akc.ru](http://www.akc.ru)

© Orel State University, 2023

## Contents

### *Theory of engineering structures. Building units*

- Loktionov A.P.** Inverse Cauchy problem for rack-and-beam structure..... 3
- Mamieva I.A., Karnevich V.V.** Geometry and static analysis of thin shells with ruled middle surfaces of three superellipses as main frame..... 16
- Marinina D.A.** The bearing capacity and deformability of welded vertical joints of large-panel buildings on embedded parts..... 28
- Nadolski V.V.** Parameters of numerical resistance models for steel elements..... 43
- Tishkov N.L., Stepanenko A.N.** Operation of steel i-beams with thin sloped-corrulated wall..... 57

### *Building and structure safety*

- Solovev S.A., Inkov A.E., Soloveva A.A.** Method of structural reliability analysis based on interval estimates of random variables..... 66
- Tur A.V., Tur V.V., Lizahub A.A.** Experimental and theoretical study of the reinforced concrete flat slabs with the central support loss..... 77

### *Construction materials and technologies*

- Bedov A.I., Ryazanova V.A., Gabitov A.I., Salov A.S., Islamgalieva D.R.** Various foundation design for industrial and public buildings with different hydrogeological conditions..... 104
- Bessonov I.V., Bulgakov B.I., Lankin A.V., Govryakov I.S., Gorbunova E.A.** The reasons for the destruction of the face brick..... 114
- Ignatyev A.A., Razgovorov P.B., Gotovtsev V.M.** Structure formation and consumer properties of granular asphalt-concrete mixtures with phosphogypsum inclusion and secondary polyethylene terephthalate..... 123

А.П. ЛОКТИОНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия

## ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА КОШИ ДЛЯ СТОЕЧНО-БАЛОЧНОЙ КОНСТРУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ

**Аннотация.** Объектом исследования являются стоечно-балочные конструктивные системы зданий с жестким сопряжением балки со стойкой. Цель исследования состоит в оценке влияния на точность решения задачи погрешности входных данных и числа заданных коэффициентов уравнения прогибов. Исследования проведены аналитическо-экспериментальными методами сеточной регуляризации, редукции измерений, решений на измерительном компакте, полиномиальной аппроксимации, линейной лагранжевой интерполяции и численного дифференцирования.

Аналитически и натурным экспериментом смоделировано жесткое сопряжение балки со стойкой. Для количественной оценки эффективности решения задачи определены значения целевого параметра и критерия оптимизации по минимуму функции Лебега. Предложено использовать полученные результаты решения обратной задачи Коши при экспериментально-теоретических исследованиях стоечно-балочных конструктивных систем.

**Ключевые слова:** балка, обратная задача Коши, модель измерения, прогиб, аппроксимация, критерий оптимизации.

A.P. LOKTIONOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Southwest State University, Kursk, Russia

## INVERSE CAUCHY PROBLEM FOR RACK-AND-BEAM STRUCTURE

**Abstract.** The object of this study is the building frames with rigid beam-to-column assemblies. The aim of the study is to assess the impact on the accuracy of the solution of the problem of the error of the input data and the number of given coefficients of the deflection equation. The studies were carried out using analytical and experimental methods of regularization, reduction of measurements, solutions on a measuring compact, polynomial approximation, linear Lagrangian interpolation and numerical differentiation.

Rigid coupling of a beam with a rack is modeled analytically and by a full-scale experiment. For a quantitative assessment of the effectiveness of solving the problem, the values of the target parameter and the optimization criterion are determined through the minimum of the Lebesgue function. It is proposed to use the obtained results of solving the inverse Cauchy problem in experimental and theoretical studies of rack-and-beam structures.

**Keywords:** beam, inverse Cauchy problem, measurement model, deflection, approximation, optimization criterion.

© Локтионов А.П., 2023

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tusnina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column // Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 64(4). Pp. 40–51. <https://doi.org/10.5862/MCE.64.4>.
2. Tusnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections // Magazine of Civil Engineering. 2017. Vol. 73(5). Pp. 25-39. <https://doi.org/10.18720/MCE.73.3>.

3. Кашеварова Г.Г., Тонков Ю.Л., Тонков И.Л. Интеллектуальная автоматизация инженерного обследования строительных объектов // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2017. Vol. 13(3). Pp. 42–57. <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57>.
4. Локтионов А.П. Информационно-измерительная система с лагранжевой аппроксимацией для экспериментально-расчетного определения усилий в элементах конструктивных систем при обследовании зданий текстильной и химической промышленности // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2017. Т. 370. № 4. С. 252–258. URL:[http://tftp.ivgpcu.com/wp-content/uploads/2017/12/370\\_55.pdf](http://tftp.ivgpcu.com/wp-content/uploads/2017/12/370_55.pdf) (дата обращения: 26.12.2022).
5. Yang C. Sensor placement for structural health monitoring using hybrid optimization algorithm based on sensor distribution index and FE grids // *Structural Control and Health Monitoring*. 2018. Vol. 5(6). <https://doi.org/0.1002/stc.2160>.
6. Люблинский В.А., Томина М.В. Экспериментальное исследование прочности и податливости вертикального сварного стыка // *Системы. Методы. Технологии*. 2018. № 3 (39). С. 154-158. doi:10.18324/2077-5415-2018-3-154-158.
7. Lehmhus D., Busse M. Structural health monitoring (SHM). In: Bosse S., Lehmhus D., Lang W. (eds). *Material Integrated Intelligent Systems Technology and Applications: Technology and Applications*. John Wiley & Sons Inc.; 2018. Pp. 529–570. 696 p. <https://doi.org/10.1002/9783527679249>.
8. Малахова А.Н., Маринина Д.А. Податливость вертикальных стыков крупнопанельных зданий на закладных деталях // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 6 (86). С.10-18. doi:10.33979/2073-7416-2019-86-6-10-18.
9. Локтионов А.П. Информационная система анализа балочных элементов под комбинированной нагрузкой // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2021. № 2. С. 45-52. doi:10.37538/0039-2383.2021.2.45.52.
10. Локтионов А.П. Информационно-измерительная система мониторинга балок в строительных конструкциях // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 23–51. doi:10.21869/2223-1560-2021-25-4-29-51.
11. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бобров В.В., Бамматов А.А., Мартыанов К.В., Пряхин С.Н. Петлевые стыки стержневой арматуры. История развития, проблемы и актуальность // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 6 (104). С. 4-11.
12. Локтионов А. П. Об измерении изгибающих нагрузок навесными электротензометрическими преобразователями // *Изв. вузов. Авиационная техника*. 1982. № 2. С. 73-75.
13. Локтионов А.П. Обзор и анализ способов и устройств измерения поперечной изгибной нагрузки на элементы шасси / *Курск. политехн. ин-т. Курск*, 1991. 45 с. – Деп. В ЦНТИ ГА 15.09.91, № 835-га91.
14. Ватульян А.О., Плотников Д.К. Обратные коэффициентные задачи в механике // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2019. № 3. С. 37-47. doi: 10.15593/perm.mech/2019.3.0.
15. Shi Z., O'Brien W. Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review // *Automation in Construction*. 2019. No. 104. Pp. 215-229. doi:10.1016/j.autcon.2019.04.002.
16. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Grid-characteristic calculation of multistorey buildings destruction // *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2020. No. 32(3). Pp. 102-114. doi:<https://doi.org/10.20948/mm-2020-03-06>.
17. Перельмутер А.В. Обратные задачи строительной механики // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. № 22(4). С. 83-101. doi:10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101.
18. Siraya T.N. Methods of data processing in measurements and metrological models // *Measurement Techniques*. 2018. No. 61. Pp. 9-16. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1380-y>.
19. Smirnova A., Bakushinsky A. On iteratively regularized predictor-corrector algorithm for parameter identification // *Inverse Problems*. 2020. Vol. 36. No. 12. id.125015. P. 30. doi:10.1088/1361-6420/abc530.
20. Кудрявцев К.Я. Алгоритм построения полинома наилучшего равномерного приближения по экспериментальным данным // *Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ*. 2019. Т. 8(5). С. 480-486. <https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X>.
21. Bakushinsky A. B., Kokurin, M. M., Kokurin, M. Yu. *Regularization Algorithms for Ill-Posed Problems. Inverse and Ill-Posed Problems Series*, 61. Boston. USA: De Gruyter; 2018. <https://doi.org/10.1515/9783110557350>.
22. Балакин Д.А., Пытьев Ю.П. Редукция измерения при наличии субъективной информации // *Математическое моделирование и численные методы*. 2018. Т. 30. № 12. С. 84–110. doi:10.31857/S023408790001938-5.
23. Verbrugge M.W., Wampler C.W., Baker D.R. Smoothing methods for numerical differentiation to identify electrochemical reactions from open-circuit-potential data // *Journal of The Electrochemical Society*. 2018. Vol. 165 No. 16. Pp. A4000-A4011. <https://doi.org/10.1149/2.0951816.jes>.
24. Loktionov A.P. Numerical differentiation in the measurement model // *Measurement Techniques*. 2019. No. 62. Pp. 673-680. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01677-z>.

25. Kalenchuk-Porkhanova A. Best Chebyshev approximation for compression of big information arrays // Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference named after A. I. Kitov "Information Technologies and Mathematical Methods in Economics and Management (IT&MM-2020)". October 15-16, 2020. Moscow, Russia. P1-13. URL:<http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/ftp/pub/publications/CEUR-WS/Vol-2830.zip.paper25.pdf>. (дата обращения 20.12.2022).
26. Boykov I.V., Krivulin N.P. An approximate method for recovering input signals of measurement transducers // Measurement Techniques. 2022. V. 64. No. 4. Pp. 943-948. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-020263>.
27. Loktionov A.P. Regularization of the lattice time function of the signal in the communication channel // Telecommunications and Radio Engineering. 2013. Vol. 72. No. 2. Pp. 161-171. doi:10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.70.
28. Мещихин И.А., Гаврюшин С.С. Критерии качества и алгоритм выбора редуцированных моделей для мониторинга технических конструкций // Математическое моделирование и численные методы. 2016. Т. 12. № 4. С. 103-121. <https://doi.org/10.18698/2309-3684-2016-4-103121>.
29. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation // Journal of Inequalities and Applications. 2016. No. 93. Pp. 1-15. <https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3>.
30. Loktionov A.P. Information measuring system of numerical differentiation for the analysis of elements of mechanical structures // Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. 2018. Vol. 12. No. 2. Pp. 53-71. doi: 10.24874/jsscm.2018.12.02.04.
31. Meshchikhin I.A., Gavryushin S.S. The envelope method in the problem of choosing a rational composition of measuring instruments // Measurement Techniques. 2021. No. 64. Pp. 151-155. doi:<https://doi.org/10.1007/s11018-021-01910-8>.
32. Локтионов А.П. Обратная задача коши для балок в строительных конструкциях // Строительство и реконструкция. 2022. № 2 (100). С. 13-25. doi:10.33979/2073-7416-2022-100-2-13-25.
33. Локтионов А.П. Восстановление начальных параметров балки при заданных младших коэффициентах уравнения прогибов // Строительная механика и расчет сооружений. 2022. № 6. С. 2-7. doi:10.37538/0039-2383.2022.6.2.7 ИФ =0,552.

## REFERENCES

1. Tusnina O.A., Danilov A.I. The stiffness of rigid joints of beam with hollow section column. Magazine of Civil Engineering. 2016. Vol. 64. No. 4. Pp. 40-51. <https://doi.org/10.5862/MCE.64.4>.
2. Tusnina V.M. Semi-rigid steel beam-to-column connections. Magazine of Civil Engineering. 2017. Vol. 73. No. 5. Pp. 25-39. <https://doi.org/10.18720/MCE.73.3>.
3. Kashevarova G.G., Tonkov, Y.L., Tonkov I.L. Intellektual'naya avtomatizatsiya inzhenernogo obsledovaniya stroitel'nykh ob'ektov [Intellectual automation of engineering survey of building objects] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2017. Vol. 13. No. 3. Pp. 42-57. <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-42-57>. (rus).
4. Loktionov A.P. Informacionno-izmeritel'naya sistema s lagranzhevoj approksimaciej dlya e'ksperimental'no-raschetnogo opredeleniya usilij v e'lementax konstruktivny'x sistem pri obsledovanii zdaniy tekstil'noj i ximicheskoy promy'shennosti [Information-measuring system of experimental and calculation determination of a bending moment with the Lagrange approximation at inspection of buildings]. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promy'shennosti. 2017. Vol. 370. No. 4. Pp. 252-258. URL:[http://tp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2017/12/370\\_55.pdf](http://tp.ivgpu.com/wp-content/uploads/2017/12/370_55.pdf) (data obrashheniya: 26.12.2022). (rus).
5. Yang C. Sensor placement for structural health monitoring using hybrid optimization algorithm based on sensor distribution index and FE grids. Structural Control and Health Monitoring. 2018. Vol. 5. No. 6. P. 2160. <https://doi.org/10.1002/stc.2160>.
6. Lyublinskiy V.A., Tomina M.V. E'ksperimental'noe issledovanie prochnosti i podatlivosti vertikal'nogo svarnogo sty'ka [Experimental study of the strength and suppleness of a vertical welded joint]. Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2018. Vol. 3. No. 39. Pp. 154-158. doi:10.18324/2077-5415-2018-3-154-158. (rus).
7. Lehmhus D., Busse M., Structural Health Monitoring (SHM). In: Bosse S., Lehmhus D., Lang W. (eds). Material Integrated Intelligent Systems Technology and Applications: Technology and Applications. John Wiley & Sons Inc.; 2018. Pp. 529–570. 696 p. <https://doi.org/10.1002/9783527679249>.
8. Malakhova A.N., Marinina D.A. Podatlivost' vertikal'ny'x sty'kov krupnopanel'ny'x zdaniy na zakladny'x detal'yax [The compliance of vertical joints of large-panel buildings made on embedded parts]. Building and Reconstruction. 2019. Vol. 86. No. 6. Pp. 10-18. doi:10.33979/2073-7416-2019-86-6-10-18. (rus).
9. Loktionov A.P. Informacionnaya sistema analiza balochny'x e'lementov pod kombinirovannoj nagruzkoy [Information system for analysis of beam elements under combined load]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2021. No. 2. Pp. 45-52. doi:10.37538/0039-2383.2021.2.45.52. (rus).

10. Loktionov A.P. Informacionno-izmeritel'naya sistema monitoringa balok v stroitel'nykh konstrukciyax [Information and Measurement System for Monitoring Beams in Building Structures]. Proceedings of the Southwest State University. 2021. Vol. 25. No. 4. Pp. 29-51. doi:10.21869/2223-1560-2021-25-4-29-51. (rus).
11. Avdeev K.V., Mamin A.N., Bobrov V.V., bammatov A.A., Martyanov K.V., Pryakhin S.N. Petlevy`e sty`ki sterzhnevoj armatury`. Istoriya razvitiya, problemy` i aktual'nost' [The loop joins of rebars. development history, problems and relevance]. Building and reconstruction. 2022. No. 6 (104). Pp. 4-11. (rus).
12. Loktionov A.P. Measurement of bending loads with suspended electric strain gages // Soviet Aeronautics. 1982. No. 25(2). Pp. 85-88.
13. Loktionov A.P. Obzor i analiz sposobov i ustrojstv izmereniya poperechnoj izgibnoj nagruzki na e`lementy` shassi [Review and analysis of methods and devices for measuring transverse bending load on chassis elements]. Kursk. politehn. in-t. Kursk, 1991. 45 p. Dep. V CNTI GA 15.09.91, № 835-ga91. (rus).
14. Vatulyan A.O., Plotnikov D.K. Obratny`e koe`fficientny`e zadachi v mexanike [Inverse coefficient problems in mechanics]. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politexnicheskogo universiteta. Mexanika. 2019. No. 3. Pp. 37-47. doi:10.15593/perm.mech/2019.3.04. (rus).
15. Shi Z., O'Brien W. Development and implementation of automated fault detection and diagnostics for building systems: A review. Automation in Construction. 2019. No. 104. Pp. 215-229. doi:10.1016/j.autcon.2019.04.002.
16. Favorskaya A.V., Petrov I.B. Grid-characteristic calculation of multistorey buildings destruction // Mathematical Models and Computer Simulations. 2020. No. 32(3). Pp. 102-114. doi:https://doi.org/10.20948/mm-2020-03-06.
17. Perelmuter A.V. Obratnye zadachi stroitel'noi mekhaniki [Inverse problems of structural mechanics]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2020. Vol. 22. No. 4. Pp. 83-101. doi:10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101. (rus).
18. Siraya T.N. Methods of data processing in measurements and metrological models // Measurement Techniques. 2018. No. 61. Pp. 9-16. https://doi.org/10.1007/s11018-018-1380-y.
19. Smirnova A., Bakushinsky A. On iteratively regularized predictor-corrector algorithm for parameter identification. Inverse Problems. 2020. Vol. 36. No. 12. id.125015. P. 30. doi:10.1088/1361-6420/abc530.
20. Kudryavcev K.Ya. Algoritm postroeniya polinoma nailuchshego ravnomernogo priblizheniya po eksperimental'nym dannym [Algorithm for constructing a polynomial of the best uniform approximation from experimental data]. Vestnik nacional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI. 2019. Vol. 8. No. 5. Pp. 480-486. https://doi.org/10.1134/S2304487X1905002X. (rus).
21. Bakushinsky A. B., Kokurin, M. M., Kokurin, M. Yu. Regularization Algorithms for Ill-Posed Problems. Inverse and Ill-Posed Problems Series, 61. Boston. USA: De Gruyter; 2018. https://doi.org/10.1515/9783110557350.
22. Balakin D. A., Pyt'ev Yu. P. Measurement reduction in the presence of subjective information // Mathematical Models and Computer Simulations. 2019. Vol. 11, No. 4. Pp. 596-610. https://doi.org/10.1134/S2070048219040033.
23. Verbrugge M.W., Wampler C.W., Baker D.R. Smoothing methods for numerical differentiation to identify electrochemical reactions from open-circuit-potential data // Journal of The Electrochemical Society. 2018. Vol. 165. No. 16. Pp. A4000-A4011. https://doi.org/10.1149/2.0951816jes.
24. Loktionov A.P. Numerical differentiation in the measurement model // Measurement Techniques. 2019. No. 62. Pp. 673-680. https://doi.org/10.1007/s11018-019-01677-z.
25. Kalenchuk-Porkhanova A. Best Chebyshev approximation for compression of big information arrays. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference named after A. I. Kitov "Information Technologies and Mathematical Methods in Economics and Management (IT&MM-2020)". October 15-16. 2020. Moscow. Russia. Pp. 1-13. URL:http://sunsite.informatik.rwth-aachen.de/ftp/pub/publications/CEUR-WS/Vol-2830.zip. paper25.pdf. (accessed 20.12.2022).
26. Boykov I.V., Krivulin N.P. An approximate method for recovering input signals of measurement transducers // Measurement Techniques. 2022. Vol. 64. No. 4. Pp. 943-948. https://doi.org/10.1007/s11018-022-020263.
27. Loktionov A.P. Regularization of the lattice time function of the signal in the communication channel // Telecommunications and Radio Engineering. 2013. Vol. 72. No. 2. Pp. 161-171. doi:10.1615/TelecomRadEng.v72.i2.70.
28. Meschikhin I.A., Gavryushin S.S. Algoritm postroeniya polinoma nailuchshego ravnomernogo priblizheniya po eksperimental'nym dannym [Algorithm for constructing a polynomial of the best uniform approximation from experimental data]. Mathematical Models and Computer Simulations. 2016. Vol. 12. No. 4. Pp. 103-121. https://doi.org/10.18698/2309-3684-2016-4-103121. (rus).
29. Ibrahimoglu B.A. Lebesgue functions and Lebesgue constants in polynomial interpolation // Journal of Inequalities and Applications. 2016. No. 93. Pp. 1-15. https://doi.org/10.1186/s13660-016-1030-3.
30. Loktionov A.P. Information measuring system of numerical differentiation for the analysis of elements of mechanical structures // Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics. 2018. Vol. 12. No. 2. Pp. 53-71. doi:10.24874/jsscm.2018.12.02.04.

31. Meshchikhin I.A., Gavryushin S.S. The envelope method in the problem of choosing a rational composition of measuring instruments // Measurement Techniques. 2021. No. 64. Pp. 151-155. doi:<https://doi.org/10.1007/s11018-021-01910-8>.

32. Loktionov A.P. Obratnaya zadacha koshi dlya balok v stroitel'ny`x konstrukciyax [Inverse cauchy problem for beams in building structures]. Building and reconstruction. 2022. No. 2 (100). Pp. 13-25. doi:[10.33979/2073-7416-2022-100-2-13-25](https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-100-2-13-25). (rus)

33. Loktionov A.P. Vosstanovlenie nachal'ny`x parametrov balki pri zadanny`x mladshix koe`fficientax uravneniya progibov [Recovery of the initial parameters of the beam with the given junior coefficients of the deflection equation]. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2022. No. 6. Pp. 2-7. doi:[10.37538/0039-2383.2022.6.2.7](https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.6.2.7), (rus)

**Информация об авторе:**

**Локтионов Аскольд Петрович**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,  
доктор технических наук, доцент.

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

**Information about authors:**

**Loktionov Askold P.**

Southwest State University, Kursk, Russia,  
doctor of engineering, associate professor.

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



И.А. МАМИЕВА<sup>1</sup>, В.В. КАРНЕВИЧ<sup>1</sup><sup>1</sup>Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

## ГЕОМЕТРИЯ И СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК С ЛИНЕЙЧАТЫМИ СРЕДИННЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ С ГЛАВНЫМ КАРКАСОМ ИЗ ТРЕХ СУПЕРЭЛЛИПСОВ

**Аннотация.** Доказано и проиллюстрировано, что имея одинаковый главный каркас поверхности можно построить три разные поверхности переноса велароидального типа. Взяв эти три разные линейчатые поверхности в качестве срединных поверхностей тонких строительных оболочек, можно расширить число архитектурных форм, приемлемых для строительной практики.

Показана возможность определения напряженно-деформированного состояния линейчатых оболочек с рассматриваемыми срединными поверхностями при помощи типового компьютерного комплекса СКАД. Из представленных изополей очевидно, что напряженно-деформированные состояния разных линейчатых оболочек на овальном плане, но с одним и тем же главным каркасом, отличаются незначительно у двух из трех оболочек. При этом было установлено, что данные две оболочки имеют отрицательную гауссову кривизну, а третья – нулевую. Следовательно, искать более оптимальную оболочку по критерию прочности среди двух оболочек с отрицательной гауссовой кривизной не имеет смысла, следует выбирать оболочку по другому критерию, например, по критерию трудоемкости изготовления.

**Ключевые слова:** тонкая оболочка, метод конечного элемента, линейчатая поверхность, алгебраическая поверхность, главный каркас поверхности, суперэллипс.

I.A. MAMIEVA<sup>1</sup>, V.V. KARNEVICH<sup>1</sup><sup>1</sup>Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

## GEOMETRY AND STATIC ANALYSIS OF THIN SHELLS WITH RULED MIDDLE SURFACES OF THREE SUPERELLIPSES AS MAIN FRAME

**Abstract.** The possibility of generating three different translational surfaces of velarodial type by having the same main frame of the surface is proved and illustrated. Using these three different ruled surfaces as middle surfaces of thin shells allows to extend the number of architectural forms in construction practice.

Static analysis of the shells with the middle surfaces under consideration is performed using the SCAD standard finite element software. The results of the analysis of different ruled shells with oval-shaped base, but of the same main frame, imply that the stress, moment and displacement distributions are almost identical in two of the three shells. Moreover, it is established that the Gaussian curvature of these two shells is negative, and is zero in the third one. Therefore, there is no sense in determining the optimal shell in terms of strength out of the two shells with negative Gaussian curvature. Rather, these two shells may be evaluated based on another criterion, for example, complexity of manufacturing.

**Keywords:** thin shell, finite element method, ruled surface, algebraic surface, main frame of surface, superellipse.

© Мамиева И.А., Карневич В.В., 2023

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krivoshapko S.N. Tangential developable and hydrodynamic surfaces for early stage of ship shape design // Ships and Offshore Structures. 2022. Published online: 26 Apr. 2022. Pp. 1-9. doi:10.1080/17445302.2022.2062165.
2. 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.

3. Карневич В.В. Построение гидродинамических поверхностей каркасами из кривых Ламе на примере корпуса подводной лодки // Вестник РУДН. Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 30-37. doi:10.22363/2312-8143-2022-23-1-30-37.
4. 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. С. 18–27. doi:10.37538/0039-2383.2022.6.18.27.
5. Weisstein E.W. Superellipse. From MathWorld – A Wolfram Web Resource. [Электронный ресурс]. URL: <https://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html> (дата обращения: 11.10.2022).
6. Мамиева И.А. Линейчатые алгебраические поверхности с главным каркасом из трех суперэллипсов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 4. С. 387–395. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-4-387-395.
7. Кривошапко С.Н. К вопросу об основных архитектурных стилях, направлениях и стилевых течениях для оболочек и оболочечных структур // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 3. С. 255-268. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-3-255-268.
8. Амиров М., Каченюк А.Н. Криволинейное проецирование на поверхности Каталана // Прикладная геометрия и инженерная графика. Киев, 1971. Вып. 13. С. 118-120.
9. Tocariu L. Stages in the study of cylindroid surfaces // The SORGING Journal. 2007. Vol. 2. No. 1. Pp. 37-40.
10. Сысоева Е.В. Научные подходы к расчету и проектированию большепролетных конструкций // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 2 (101). С. 131–141. doi:10.22227/1997-0935.2017.2.131-141.
11. Goldenveizer A.L. Theory of Elastic Thin Shells. New York: Published by Pergamon Press. 1961. 544 p.
12. Кривошапко С.Н. Два вида расчетных уравнений для оболочек в произвольных криволинейных координатах // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 1. С. 15-22.
13. Григоренко Я.М., Тимонин А.М. Об одном подходе к численному решению краевых задач теории оболочек сложной геометрии в неортогональных криволинейных системах координат // Доклады Академии наук Украинской ССР. 1991. № 4. Вып. 9. С. 41–44.
14. Тупилова Е.М. Анализ метода В.Г. Рекача для расчета напряженно-деформированного состояния длинного пологого косоугольного геликоида // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 1 (264). С. 14-20.
15. Schnobrich W.C. Different methods of numerical analysis of shells // Lect. Notes Eng., 1987. No.26. Pp. 1-17.
16. Noor A.K. Bibliography of books and monographs on finite element technology // AMR. June 1991. Vol. 44. No. 6. Pp. 307-317.
17. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Микитаренко М.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. Вычислительный комплекс SCAD. М.: Изд-во СКАД СОФТ, 2021. 656 с.
18. Flöry S., Nadai Y., Isvoranu F., Pottmann H., Wallner J. Ruled free form. In L. Hesselgren et al. (eds.), *Advances in Architectural Geometry 2012*, Springer 2012. Pp. 57–66.
19. Ключков Ю.В., Вахнина О.В., Киселева Т.А. Расчет тонких оболочек на основе треугольного конечного элемента с корректирующими множителями Лагранжа // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 5. Pp. 55-59.
20. Flöry S., Pottmann H. Ruled surfaces for rationalization and design in architecture // Proc. ACADIA (Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture). 2010. Pp. 103-109. doi:10.52842/conf.acadia.2010.103.
21. Сальков Н.А. Общие принципы задания линейчатых поверхностей. Часть 2 // Геометрия и графика. 2019. Т. 7. № 1. С. 14–27. doi:10.12737/article\_5c9201eb1c5f06.47425839.
22. Maleček Kamil, Szarková Dagmar. A method for creating ruled surfaces and its modifications // KoG. 2002. Vol. 6. No. 6. Pp. 59-66.
23. Ванин В.В., Шамбина С.Л., Вирченко Г.И. Вариантное компьютерное макетирование оболочек на основе полипараметризации их срединных поверхностей // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2015. № 6. С. 3–8.

## REFERENCES

1. Krivoshapko S.N. Tangential developable and hydrodynamic surfaces for early stage of ship shape design // *Ships and Offshore Structures*. Published online: 26 Apr. 2022. Pp. 1-9. doi:10.1080/17445302.2022.2062165.
2. 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. (rus)
3. Karnevich V.V. Generating hydrodynamic surfaces by families of Lamé curves for modelling submarine hulls // *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022. Vol. 23. No. 1. Pp. 30-37. doi:10.22363/2312-8143-2022-23-1-30-37. (rus)

4. 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. (rus)
5. Weisstein E.W. Superellipse. From MathWorld – A Wolfram Web Resource. [Online]. URL: <https://mathworld.wolfram.com/Superellipse.html> (date of application:11.10.2022).
6. Mamieva I.A. Ruled algebraic surfaces with a main frame from three superellipses // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. Vol. 18. No. 4. Pp. 387-395. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-4-387-395. (rus).
7. Krivoshapko S.N. On the basic architectural styles, directions, and style flows for shells and shell structures // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022. Vol. 18. No. 3. Pp. 255-268. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-3-255-268. (rus).
8. Amirov M., Kachenyuk A.N. Curvilinear проецирование on Catalan's surface // *Prikladnaya Geometriya i Inzhenernaya Grafika*. Kiev, 1971. No. 13. Pp. 118-120.
9. Tocariu L. Stages in the study of cylindroid surfaces // *The SORGING Journal*. 2007. Vol. 2. No. 1. Pp. 37-40.
10. Sysoeva E.V. Scientific approaches to calculation and design of large-span structures // *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017. Vol. 12. No. 2(101). Pp. 131-141. doi:10.22227/1997-0935.2017.2.131-141. (rus).
11. Goldenveizer A.L. *Theory of Elastic Thin Shells*. New York: Published by Pergamon Press, 1961. 544 p.
12. Krivoshapko S.N. Two types of governing equations for shells with the middle surfaces given in arbitrary curvilinear coordinates // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2017. No. 1. Pp. 15-22. (rus).
13. Grigorenko Ya.M., Timonin A.M. On one approach to the numerical solution of boundary problems on theory of complex geometry shells in the non-orthogonal curvilinear coordinate systems // *Doklady AN Ukrainskoy SSR [Reports of AS of Ukraine USSR]*, 1991. Vol. 4. No. 9. Pp. 41-44. (rus).
14. Tupikova E.M. Investigation of V.G. Rekach's method of stress-strain analysis of the shell of long shallow oblique helicoid form // *Struct. Mech. and Analysis of Constr.* 2016. No. 1. Pp. 14-19. (rus).
15. Schnobrich W.C. Different methods of numerical analysis of shells // *Lect. Notes Eng.*, 1987. No. 26. Pp. 1-17.
16. Noor A.K. Bibliography of books and monographs on finite element technology // *AMR*. June 1991. Vol. 44. No. 6. Pp. 307-317.
17. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Mikitarenko M.A., Perelmuter A.V., Perelmuter M.A. *Computing Complex SCAD*. Moscow: SCAD SOFT Publ., 2021. 656 p.
18. Flöry S, Nadai Y., Isvoranu F., Pottmann H., Wallner J. Ruled free form. In L. Hesselgren et al. (eds.), *Advances in Architectural Geometry 2012*, Springer 2012. Pp. 57-66.
19. Klochkov Y.V., Vakhinina O.V., Kiseleva T.A. Calculation of thin shells on the basis of the triangular final element with the correcting Lagrange's coefficients // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2015. No. 5. Pp. 55-59. (rus).
20. Flöry S., Pottmann H. Ruled surfaces for rationalization and design in architecture // *Proc. ACADIA (Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture)*. 2010. Pp. 103-109. doi:10.52842/conf.acadia.2010.103.
21. Sal'kov N.A. Obshchie printsiipy zadaniya lineychatykh poverkhnostey. Chast'2 [General principles of definition of linear surfaces. Part 2]. *Geometriya i grafika [Geometry and Graphics]*, 2019. Vol. 7. No. 1. Pp. 14-27. doi:10.12737/article\_5c9201eb1c5f06.47425839. (rus).
22. Maleček Kamil, Szarková Dagmar. A method for creating ruled surfaces and its modifications. *KoG*, 2002. Vol. 6. No. 6. Pp. 59-66.
23. Vanin V.V., Shambina S.L., Virchenko G.I. Variant computer shell prototyping based on polyparameterization of middle surfaces // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2015. No. 6. Pp. 3-8. (rus).

### Информация об авторах:

#### **Мамиева Ираида Ахсарбеговна**

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия,  
ассистент департамента строительства инженерной академии.  
E-mail: [i\\_mamieva@mail.ru](mailto:i_mamieva@mail.ru)

#### **Карневич Валерий Вячеславович**

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия,  
аспирант департамента строительства инженерной академии.  
E-mail: [valera.karnevich@gmail.com](mailto:valera.karnevich@gmail.com)

**Information about authors:**

**Mamieva Iraida A.**

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia,  
assistant of the department of Civil Engineering, Academy of Engineering.

E-mail: [i\\_mamieva@mail.ru](mailto:i_mamieva@mail.ru)

**Karnevich Valery V.**

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia,  
PhD student of the department of Civil Engineering, Academy of Engineering.

E-mail: [valera.karnevich@gmail.com](mailto:valera.karnevich@gmail.com)

Д.А. МАРИНИНА<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ СВАРНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЫКОВ КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ НА ЗАКЛАДНЫХ ДЕТАЛЯХ

*Аннотация.* Анализ результатов исследований, представленных в научно-технической литературе, показал отсутствие данных о работе сварных вертикальных стыков крупнопанельных зданий на закладных деталях с соединительными элементами в виде гнутых и прокатных уголков.

С целью определения технических параметров, необходимых для расчета и проектирования крупнопанельных зданий, были проведены экспериментальные исследования работы сварных вертикальных стыков на закладных деталях с соединительными элементами в виде гнутых и прокатных уголков при действии растягивающих и сдвигающих усилий. Статическая нагрузка прикладывалась ступенями до разрушения опытных образцов. В ходе испытаний фиксировались перемещения в месте изгиба соединительных элементов опытных образцов. На основании полученных экспериментальных данных определены значения податливости соединительных элементов вертикального стыка на закладных деталях.

Вычислены и предложены поправочные коэффициенты для точного определения податливости соединительных элементов в виде прокатных и гнутых уголков вертикального стыка на закладных деталях. Выявлен различный характер деформирования и разрушения сварных вертикальных стыков на закладных деталях с соединительными элементами в виде гнутых и прокатных уголков с одинаковыми геометрическими размерами при действии на стыки растягивающих и сдвигающих усилий.

**Ключевые слова:** крупнопанельные здания, сварной вертикальный стык, испытание на сдвиг, испытание на растяжение, податливость, упругая стадия работы стыка, разрушающая нагрузка.

D.A. MARININA<sup>1</sup><sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

## THE BEARING CAPACITY AND DEFORMABILITY OF WELDED VERTICAL JOINTS OF LARGE-PANEL BUILDINGS ON EMBEDDED PARTS

**Abstract.** Analysis of the research results presented in the scientific and technical literature showed the absence of data about the operation of welded vertical joints of large-panel buildings on embedded parts with connecting elements in the form of bent and rolled angle bars. In order to determine the technical parameters necessary for the calculation and design of large-panel buildings, experimental researches of the operation of welded vertical joints on embedded parts with connecting elements in the form of bent and rolled corners under the action of tensile and shear forces were carried out. The static load was applied in stages until the destruction of the prototypes. During the experimental researches, the displacements in the place of bending of the connecting elements of the prototypes were recorded. On the basis of the experimental data obtained, the values of compliance of the connecting elements of the vertical joint on embedded parts were determined. Correction coefficients for the correct definition the compliance of connecting elements in the form of rolled and bent angle bars of a vertical joint on embedded parts are calculated and proposed. A different nature of deformation and destruction of welded vertical joints on embedded parts with connecting elements in the form of rolled and bent angle bars with the same geometric dimensions under the action of tensile and shear forces on the joints is revealed.

**Keywords:** *large-panel buildings, welded vertical joint, shear test, tensile test, compliance, elastic stage of joint operation, breaking load.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малахова А.Н., Маринина Д.А. Податливость вертикальных стыков крупнопанельных зданий на закладных деталях // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 6 (86). С. 10-16.
2. Горачек Е., Лишак В.И., Пуме Д., Драгилов И.И., Камейко В.А., Морозов Н.В., Цимблер В.Г. Прочность и жесткость стыковых соединений крупнопанельных конструкций. Опыт СССР. Москва: Стройиздат, 1980. 191 с.
3. СП 335.1325800.2017. Крупнопанельные конструктивные системы. Правила проектирования.
4. Пособие по проектированию жилых зданий Вып. 3 Конструкции жилых зданий (к СНиП 2.08.01-85).
5. Миронова Ю.В., Абдрахимова Н.С., Халиуллин А.Р. Повышение сопротивляемости несущей системы бескаркасного здания с бессварными вертикальными стыками прогрессирующему разрушению // *Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. № 4 (38). С. 229-235.
6. Митасов В.М., Пантелеев Н.Н. Экспериментальные исследования новой конструкции стыка стеновых панелей с перекрытием в крупнопанельных зданиях // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2014. № 12(672). С. 5-12.
7. Николаев С.В. Крупнопанельное домостроение – общие вопросы // *Жилищное строительство*. 2012. № 4. С. 4-24.
8. Чистяков Е.А., Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В. Учет податливости стыковых соединений дискретного типа в расчетах конструктивных систем крупнопанельных зданий – *Academia // Архитектура и строительство*. 2017. № 2. С.123-127.
9. Li H., Shi G. Material Modeling of Concrete for the Numerical Simulation of Steel Plate Reinforced Concrete Panels Subjected to Impacting Loading // *Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*. 2017. № 139. Pp. 351-366.
10. Yuniarsya E., Kono S., Tani M., Taleb R., Watanabe H., Obara T., Mukai T. Experimental study of lightly reinforced concrete walls upgraded with various schemes under seismic loading // *Engineering Structures*. 2017. № 138. С. 131-145.
11. Malakhova A.N., Davletbaeva D.A. The consideration of compliance of structural joints in calculation of large panel buildings // *XXII International Scientific Conference "Construction the Formation of Living Environment" (FORM-2019), Tashkent, Uzbekistan. E3S Web of Conferences 97, 04010 (2019), Volume 97. doi:https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704010.*
12. Malakhova A.N. Davletbaeva D.A. The consideration of complince of structural joints in the numerical calculation of large-panel buildings // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1425 012081. doi:https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012081
13. Володин Н.М., Кашеев Г.В. Определение податливости на сдвиг соединений между сборными элементами каркасно-панельных зданий // *Исследования конструкций крупнопанельных зданий*. Москва: Стройиздат, 1981. С. 71-80.
14. Данель В.В., Кузьменко И.Н. Жесткости стыков крупнопанельных зданий: анализ формул, рекомендации по их уточнению и использованию в конечноэлементных моделях // *Актуальные проблемы исследований по теории сооружений. Сборник научных статей. Часть 2*. Москва: ЦНИИСК им. Кучеренко, 2009. С. 261 - 273.
15. Зенин С.А., Шарипов Р.Ш., Кудинов О.В. Анализ существующих методов оценки податливости связей крупнопанельных зданий // *Бетон и железобетон*. 2016. № 3. С. 27-29.
16. Дербенцев И.С., Тарасов М.В., Карякин А.А. Натурные испытания вертикальных шпоночных стыков железобетонных стеновых панелей с петлевыми гибкими связями на сдвиг // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. Т 21. № 3. С. 13-22.
17. Ahilan R., Anandhi S., Govindharajan V. Experimental investigation of vertical connections in precast wall panel under shear load // *Int. J. Sci. Technol. Eng*. 2016. V. 2. № 12. Pp. 217–222.
18. Biswal A. Prasad A.M., Sengupta A.K. Study of shear behavior of grouted vertical joints between precast concrete wall panels under direct shear loading // *Struct. Concr*. 2019. V. 20. № 2. P. 564–582.

## REFERENCES

1. Malakhova A.N., Marinina D.A. Podatlivost' vertikal'nykh stykov krupnpanel'nykh zdaniĭ na zakladnykh detaliakh [The compliance of vertical joints of large-panel buildings made on embedded parts] // *Stroitel'stvo i rekonstruktsiia*. 2019. No. 6 (86). Pp. 10-16. (rus)
2. Gorachek E., Lishak V.I., Pume D., Dragilov I.I., Kameiko V.A., Morozov N.V., Simbler V.G. Prochnost' i zhestkost' stykovykh soedinenii krupnpanel'nykh konstruktсий. Opyt SSSR [Strength and rigidity of butt joints of large-panel structures. USSR experience.]. Moskva: Stroĭizdat, 1980. 191 p. (rus)
3. SP 335.1325800.2017. Krupnpanel'nye konstruktivnye sistemy. Pravila proektirovaniia [Large-panel structural systems]. (rus)

4. Posobie po proektirovaniu zhilykh zdaniĭ Vyp. 3 Konstruktsii zhilykh zdaniĭ (k SNiP 2.08.01-85) [Manual for the design of residential buildings Vol. 3 Structures of residential buildings]. (rus)
5. Mironova I.U., Abdrakhimova N.S., KHaliullin A.R. Povyshenie soprotivliaemosti nesushcheĭ sistemy beskarkasnogo zdaniia s bessvarnymi vertikal'nymi stykami progressiruiushchemu razrusheniui [Improving the resistance of the supporting system of a frameless building with non-welded vertical joints to progressive destruction] // Izvestiia kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2016. No. 4 (38). Pp. 229-235. (rus)
6. Mitasov V.M., Pantelev N.N. Ėksperimental'nye issledovaniia novoĭ konstruktsii styka stenovykh panelei s perekrytiem v krupnopanel'nykh zdaniiax [Experimental studies of a new design of the joint between wall panels and ceilings in large-panel buildings] // Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedeniĭ. Stroitel'stvo. 2014. No. 12(672). Pp. 5-12. (rus)
7. Nikolaev S.V. Krupnopanel'noe domostroenie – obshchie voprosy [Large-panel housing construction - general issues] // ZHilishchnoe stroitel'stvo. 2012. No. 4. Pp. 4-24. (rus)
8. CHistiakov E.A., Zenin S.A., SHaripov R.SH., Kudinov O.V. Uchet podatlivosti stykovykh soedineniĭ diskretnogo tipa v raschetakh konstruktivnykh sistem krupnopanel'nykh zdaniĭ – Academia [Accounting for the flexibility of butt joints of a discrete type in the calculations of structural systems of large-panel buildings] // Arkhitektura i stroitel'stvo. 2017. No. 2. Pp. 123-127. (rus)
9. Li H., Shi G. Material Modeling of Concrete for the Numerical Simulation of Steel Plate Reinforced Concrete Panels Subjected to Impacting Loading // Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME. 2017. No. 139. Pp. 351-366.
10. Yuniarsya E., Kono S., Tani M., Taleb R., Watanabe H., Obara T., Mukai T. Experimental study of lightly reinforced concrete walls upgraded with various schemes under seismic loading // Engineering Structures. 2017. No. 138. Pp. 131-145.
11. Malakhova A.N., Davletbaeva D.A. The consideration of compliance of structural joints in calculation of large panel buildings // XXII International Scientific Conference "Construction the Formation of Living Environment" (FORM-2019), Tashkent, Uzbekistan. E3S Web of Conferences 97, 04010 (2019), Vol. 97. doi:<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704010>.
12. Malakhova A.N., Davletbaeva D.A. The consideration of complince of structural joints in the numerical calculation of large-panel buildings // Journal of Physics: Conference Series. 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1425 012081. doi:<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1425/1/012081/>
13. Volodin N.M., Kashcheev G.V. Opredelenie podatlivosti na sdvig soedineniĭ mezhdru sbornymi ÷elementami karkasno-panel'nykh zdaniĭ [Determination of compliance with shear joints between prefabricated elements of frame-panel buildings] // Issledovaniia konstruktsii krupnopanel'nykh zdaniĭ. Moskva: Stroizdat, 1981. Pp. 71-80. (rus)
14. Danel' V.V., Kuz'menko I.N. ZHestkosti stykov krupnopanel'nykh zdaniĭ: analiz formul, rekomendatsii po ikh utochneniiu i ispol'zovaniui v konechno÷elementnykh modeliakh [Joint stiffness of large-panel buildings: analysis of formulas, recommendations for their refinement and use in finite element models] // Aktual'nye problemy issledovaniĭ po teorii sooruzheniĭ. Sbornik nauchnykh stateĭ. CHast' 2. Moskva: TSNIISK im. Kucherenko, 2009. Pp. 261 - 273. (rus)
15. Zenin S.A., SHaripov R.SH., Kudinov O.V. Analiz sushchestvuiushchikh metodov otsenki podatlivosti sviazeĭ krupnopanel'nykh zdaniĭ [Analysis of existing methods for assessing the compliance of connections of large-panel buildings] // Beton i zhelezobeton. 2016. No. 3. Pp. 27-29. (rus)
16. Derbentsev I.S., Tarasov M.V., Kariakin A.A. Naturnye ispytaniia vertikal'nykh shponochnykh stykov zhelezobetonnykh stenovykh panelei s petlevymi gibkimi sviaziami na sdvig [Field tests of vertical keyed joints of reinforced concrete wall panels with flexible loop ties for shear] // Vestnik IUUrGU. Seriiia «Stroitel'stvo i arkhitektura». T. 21. No. 3. Pp. 13-22. (rus)
17. Ahilan R., Anandhi S., Govindharajan V. Experimental investigation of vertical connections in precast wall panel under shear load // Int. J. Sci. Technol. Eng. 2016. V. 2. No. 12. Pp. 217–222.
18. Biswal A. Prasad A.M., Sengupta A.K. Study of shear behavior of grouted vertical joints between precast concrete wall panels under direct shear loading // Struct. Concr. 2019. V. 20. No. 2. Pp. 564–582.

### Информация об авторе:

#### Маринина Дарья Александровна

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

### Information about author:

#### Marinina Daria Al.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,  
postgraduate student of the department of Reinforced Concrete and Stone Structures.  
E-mail: [davletbaevadasha@mail.ru](mailto:davletbaevadasha@mail.ru)

В.В. НАДОЛЬСКИЙ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь

## ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

***Аннотация.** Использование численных моделей для анализа поведения стальных элементов обладает неоспоримыми плюсами и открывает ряд перспективных направлений для исследования сложных или новых конструктивных решений. Развитие вычислительной техники и программных комплексов даёт этому направлению новый этап развития – применение численных моделей в повседневном проектировании. Для более широкого использования численных моделей и обеспечения сопоставимости результатов важно выработать универсальные принципы построения численных моделей с последующей регламентацией в нормативных документах. В рамках данного исследования сделан акцент на применении численных моделей наравне с классическими (формульными) моделями, и в первую очередь для этого выполнен обзор и систематизация наиболее важных параметров численных моделей несущей способности. Представлены указания по назначению свойств материалов, типа конечного элемента, качества сетки, величины и формы несовершенств применительно к стальным конструкциям. Полученные результаты представляют интерес для дальнейших исследований по унификации требований к параметрам численных моделей и их верификации на основании экспериментальных данных с вычислением статистических характеристик неопределённости численной модели.*

***Ключевые слова:** численная модель несущей способности, стальные конструкции, неопределённость, метод конечных элементов.*

V.V. NADOLSKI<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Brest State Technical University, Brest, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

## PARAMETERS OF NUMERICAL RESISTANCE MODELS FOR STEEL ELEMENTS

***Abstract.** The use of numerical models to analyze the behavior of steel elements has undeniable advantages and opens up a number of promising areas for the study of complex or new design solutions. The development of computer technology and software gives this direction a new stage of development - the use of numerical models in everyday design. For wider use of numerical models and ensuring comparability of results, it is important to develop universal principles for constructing numerical models with subsequent regulation in normative documents. Within the framework of this study, emphasis is placed on the use of numerical models on a par with classical (formula) models, and first of all, for this purpose, a review and systematization of the most important parameters of numerical models of load-bearing capacity is carried out. The instructions on the purpose of the properties of materials, the type of the final element, the quality of the mesh, the size and shape of imperfections applied to steel structures are presented. The results obtained are of interest for further research on the unification of the requirements for the parameters of numerical models and their verification based on experimental data with the calculation of statistical characteristics of the uncertainty of the numerical model.*

***Keywords:** numerical model of load-bearing capacity, steel structures, uncertainty, finite element method.*



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 80. P. 202–212. doi:10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. Pp. 327–343. doi:10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. Pp. 344–353. doi:10.1016/j.jcsr.2014.06.017.
4. Kövesdi B., Kuhlmann U., Dunai L. Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs. // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2010. Vol. 54. P. 79–88.
5. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading // *Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022, Ostrava, 26-27 May 2022*. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering. 2021. P. 12-19.
6. Seitz M. Longitudinally stiffened girder webs subjected to patch loading. Institute for Structural Design. Universität Stuttgart. 2005. 250 p.
7. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research // *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. Vol. 158. P. 213–229. doi:10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
8. Pavlovčič L., Detzel A., Kuhlmann U., Beg D. Shear resistance of longitudinally stiffened panels. Part 1: Tests and numerical analysis of imperfections // *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63(3). P. 337-350.
9. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders—Tests and numerical model verification // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 85. P. 116–129. doi:10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
10. Estrada I., Real E., Mirambell E. General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part II: Extended numerical study and design proposal // *Journal of Constructional Steel Research*. 2007. Vol. 63. P. 985–996. doi:10.1016/j.jcsr.2006.08.0.
11. Ботян С.С., Жамойдик С.М., Кудряшов В.А., Олесюк Н.М., Писченков И.А. Оценка огнестойкости стальных строительных конструкций с учетом влияния теплообмена с примыкающими смежными конструкциями // *Вестн. Ун-та гражд. защиты МЧС Беларуси*. 2021. Т. 5. № 3. С. 278-288. doi:10.33408/2519-237X.2021.5-3.278.
12. Надольский В.В. Расчет и конструирование фланцевого соединения элементов прямоугольного сечения, подверженных центральному растяжению // *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2018. № 16. С. 121–130.
13. Перельмутер А. В. , Сливкер. В.И. Расчетные модели сооружений и возможностью их анализа. Москва. СКАД СОФТ, 2011. 732 с.
14. Ljungström N., Karlberg O. Girders with Trapezoidally Corrugated Webs under Patch. Thesis 2010:146. Sweden, Göteborg, 2010. 185 p.
15. 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.
16. 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.
17. BSK. *Boverkets Handbok om Stålkonstruktioner*, BSK 07, November 2007.
18. Yun X., Gardner L. Stress-strain curves for hot-rolled steels // *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 133. P. 36–46.
19. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*» (с Поправками, с Изменениями N 1, 2). Москва: Стандартинформ, 2017.
20. Буханько А.А. Условие пластичности, связанное с линиями уровня поверхности деформационных состояний, для различных процессов деформирования // *Вестник СамГУ. Естественнонаучная серия*. 2013. № 9/2(110). С. 43-53.
21. Браутман Л., Крок Р. Композиционные материалы. Том 2: Механика композиционных материалов. Москва : Мир, 1978. 438 с.
22. Soboyejo W.O. *Mechanical properties of engineered materials*. New York : Marcel Dekker, 2003. 146 p.
23. Wyrzykowski J.W., Pleszakow E., Sieniawski J. *Odształcanie i pękanie metali*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1999. 406 p.
24. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. *Theory of plates and shells*. New York : McGraw-Hill, 1959. 580 p.
25. Love A. E. H. On the small free vibrations and deformations of elastic shells // *Philosophical trans. of the Royal Society (London)*, 1888. Vol. 17. Pp. 491—549. doi:10.1098/rsta.1888.0016.

26. Амбарцумян С. А. Теория анизотропных пластин: Прочность, устойчивость и колебания. 2-е изд., доп. Москва: Наука, 1987. 360 с.
27. Reissner E. On the theory of bending of elastic plates // *Journal of Mathematical Physics*. 1944. Vol. 23. Pp. 184-191.
28. Перушев Е. Г. Развитие и применение МКЭ для решения геометрически нелинейных задач. Дис. канд. техн. наук: Москва. 1984. 215 с.
29. Crisfield M. An arc-length method including line searches and accelerations // *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1983. Vol. 19. Pp. 1269-1289.
30. Riks E. An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems // *International Journal of Solids Structures*. 1979. № 15. Pp. 529-551.
31. Walz J.E. Accuracy and convergence of finite element approximations. National Aeronautics And Space Administration Hampton Va Langley Research Center. 1968. Pp. 995-1027.
32. Pin T. The convergence of finite element method in solving linear elastic problems // *International Journal of Solids and Structures*. 1967. Vol. 5. Pp. 865-879.
33. Drabek P., Milota J. *Methods of Nonlinear Analysis: Applications to Differential Equations* // Springer Science & Business Media. 2007. 568 p.
34. Baum C.E. Energy Norms and 2-Norms // *Environmental and Space Electromagnetics*. Springer, Tokyo. 1991. 10.1007/978-4-431-68162-5\_49.
35. Tur A., Tur V., Lizahub A. An innovative approach to safety of non-linear analysis applied to structural robustness as-sessment // *Civil and Environmental Engineering*. 2018. № 9. Pp. 137-141.
36. Siemens. Basic Nonlinear Analysis User's Guide. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. [https://docs.plm.automation.siemens.com/data\\_services/resources/nxnastran/10/help/en\\_US/tdocExt/pdf/bas\\_nonlinear.pdf](https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/tdocExt/pdf/bas_nonlinear.pdf) (Date of access: 08.01.2022).
37. Chacon R., Mirambell E., Real E. Influence of designer-assumed initial conditions on the numerical modelling of steel plate girders subjected to patch loading // *Thin-Walled Struct.* 2009. Vol. 47. Pp. 391-402.
38. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading // *Thin-Walled Struct.* 2012. Vol. 53. Pp. 15-25. doi:10.1016/j.tws.2011.12.003.
39. Flores R. Resistance of Transversally Stiffened Hybrid Steel Plate Girders to Concentrated Loads. Doctoral Thesis. Barcelona, Polytechnic University of Catalonia, 2009. 221 p.
40. Gozzi J. Patch loading resistance of plated girders - ultimate and serviceability limit state: Doctoral Thesis. Sweden, Luleå University of Technology, 2007. 189 p.
41. Ruff D.C. Der Einfluss von Imperfektionen auf das Tragverhalten von Platten // *Stahlbau*. 1999. Vol. 68. Pp. 829-834.
42. Ruff D.C., Schulz U. Ergänzende Stellungnahme zum Einfluss von Imperfektionen auf das Tragverhalten von Platten // *Stahlbau*. 2000. Vol. 69(6). Pp. 503 - 527.
43. Rusch A., Lindner J. Tragfähigkeit von beulgefährdeten Querschnittselementen unter Berücksichtigung von Imperfektionen // *Stahlbau*. 2001. Vol. 70(10). Pp. 765-774.
44. Schmidt H. Stability of steel shell structures: General report // *Journal of Constructional Steel Research*. 2000. Vol. 55(1-3). Pp. 159-181.
45. Надольский В.В. Неопределенности расчетных моделей сопротивления стальных конструкций // *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2016. № 8. С. 66-72.
46. Кужава З. Статистическая оценка случайных неправильностей реальных центрально – сжатых стальных стержней // *Строительная механика и расчет сооружений*. 1982. № 5. С. 61-62.
47. Bjorhovde R. Columns: From Theory to Practice // *AISC Engineering Journal*. 1988. Vol. 25. Pp. 21-34.
48. Fukumoto Y. Evaluation of multiple column curves using the experimental data-base approach // *Journal of Constructional Steel Research*. 1983. Vol. 3. Pp. 2-19.

## REFERENCES

1. Graciano C., Ayestarán A. Steel plate girder webs under combined patch loading, bending and shear // *Journal of Constructional Steel Research*. 2013. Vol. 80. Pp. 202-212. doi:10.1016/j.jcsr.2012.09.018.
2. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders Part I: Longitudinally unstiffened girders // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. Pp. 327-343. doi:10.1016/j.jcsr.2014.06.018.
3. Kövesdi B., Alcaine J., Dunai L., Braun B. Interaction behaviour of steel I-girders; part II: Longitudinally stiffened girders // *Journal of Constructional Steel Research*. 2014. Vol. 103. Pp. 344-353. doi:10.1016/j.jcsr.2014.06.017.
4. Kövesdi B., Kuhlmann U., Dunai L. Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2010. Vol. 54. Pp. 79-88.

5. Nadolski V., Marková J., Podymako V., Sykora M. Pilot numerical analysis of resistance of steel beams under combined shear and patch loading // Proceedings of conference Modelling in Mechanics 2022, Ostrava, 26-27 May 2022. Ostrava: VSB - Technical University of Ostrava, Faculty of Civil Engineering. 2021. Pp. 12-19.
6. Seitz M. Longitudinally stiffened girder webs subjected to patch loading. Institute for Structural Design. Universität Stuttgart. 2005. 250 p.
7. Kovacevic S., Markovic N., Sumarac D., Salatic R. Influence of patch load length on plate girders. Part II: Numerical research // Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 158. Pp. 213–229. doi:10.1016/j.jcsr.2019.03.025.
8. Pavlovčič L., Detzel A., Kuhlmann U., Beg D. Shear resistance of longitudinally stiffened panels. Part 1: Tests and numerical analysis of imperfections // Journal of Constructional Steel Research. 2007. Vol. 63(3). Pp. 337-350.
9. Sinur F., Beg D. Moment–shear interaction of stiffened plate girders—Tests and numerical model verification // Journal of Constructional Steel Research. 2013. Vol. 85. Pp. 116–129. doi:10.1016/j.jcsr.2013.03.007.
10. Estrada I., Real E., Mirambell E. General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part II: Extended numerical study and design proposal // Journal of Constructional Steel Research. 2007. Vol. 63. Pp. 985–996. doi:10.1016/j.jcsr.2006.08.0.
11. Botyan S.S., ZHamojdik S.M., Kudryashov V.A., Olesiyuk N.M., Pischenkov I.A. Ocenka ognestojkosti stal'nyh stroitel'nyh konstrukcij s uchetom vliyaniya teploobmena s primykayushchimi smezhnymi konstrukcijami. [Assessment of fire resistance of steel building structures taking into account the influence of heat exchange with adjacent adjacent structures.] // Vestnik Universiteta grazhdanskoj zashchity MCHS Belarusi. 2021. Vol. 3. Pp. 278-288. doi:10.33408/2519-237X.2021.5-3.278.
12. Nadol'skij V.V. Raschet i konstruirovaniye flancevogo soedineniya elementov pryamo-ugol'nogo secheniya, podverzhennyh central'nomu rastyazheniyu [Calculation and design of the flange connection of rectangular cross-section elements subject to central tension] // Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Polotsk State University]. 2018. No. 16. Pp. 121–130.
13. Perel'muter A.V., Slivker. V.I. Raschetnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost'yu ih analiza [Design models of structures and the possibility of their analysis]. Moscow. SCUD SOFT, 2011. 732 p.
14. Ljungström N., Karlberg O. Girders with Trapezoidally Corrugated Webs under Patch. Thesis 2010:146. Sweden, Göteborg, 2010. 185 p.
15. Nadol'skij V.V., Podymako V.I. Ocenka nesushchej sposobnosti stal'noj balki metodom konechnykh elementov pri sovmestnom dejstvii lokal'nyh i sdvigovykh usilij[Evaluation 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. No. 2 (100). Pp. 26-43.
16. Nadol'skij V.V., Vihlyayev A.I. Ocenka nesushchej sposobnosti balok s gofrirovannoj sten-koj metodom konechnykh elementov pri dejstvii lokal'noj nagruzki [Evaluation of the load-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. Vyp. 6. Pp. 693–706. doi:10.22227/1997-0935.202.
17. BSK. Boverkets Handbok om Stålkonstruktioner, BSK 07, November 2007.
18. Yun X., Gardner L. Stress-strain curves for hot-rolled steels // Journal of Constructional Steel Research. 2017. Vol. 133. Pp. 36–46.
19. SP 16.13330.2017 «Stal'nye konstrukcii. Aktualizirovannaya redakciya SNIp II-23-81\*» (s Popravkami, s Izmeneniyami N 1, 2). [Steel structures. Updated version of SNIp II-23-81\* " (as Amended, with Amendments N 1, 2)]. Moskva: Standartinform, 2017.
20. Buhan'ko A.A. Uslovie plastichnosti, svyazannoe s liniyami urovnya poverhnosti deformatsionnykh sostoyanij, dlya razlichnykh processov deformirovaniya [The plasticity condition associated with the lines of the surface level of the deformation states for various deformation processes]. Vestnik SamGU. 2013. No. 9/2(110). Pp. 43-53.
21. Brautman L., Krok R. Kompozicionnye materialy. Tom 2: Mekhanika kompozicionnykh materialov [Composite materials. Volume 2: Mechanics of composite materials.]. Moskva : Mir, 1978. 438 p.
22. Soboyejo W.O. Mechanical properties of engineered materials. New York : Marcel Dekker, 2003. 146 p.
23. Wyrzykowski J.W., Pleszakow E., Sieniawski J. Odształcanie i pękanie metali. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1999. 406 p.
24. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of plates and shells. New York : McGraw-Hill, 1959. 580 p.
25. Love A. E. H. On the small free vibrations and deformations of elastic shells. Philosophical trans. of the Royal Society (London), 1888. Vol. 17. Pp. 491-549. doi:10.1098/rsta.1888.0016.
26. Ambarcumyan S.A. Teoriya anizotropnykh plastin: Prochnost', ustojchivost' i kolebaniya. [Theory of anisotropic plates: Strength, stability and vibrations.] 2- e izd., dop. Moskva : Nauka, 1987. 360 p.
27. Reissner E. On the theory of bending of elastic plates. Journal of Mathematical Physics. 1944. Vol. 23. Pp. 184-191.
28. Perushev E.G. Razvitie i primeneniye MKE dlya resheniya geometricheski nelinejnykh zadach [Development and application of FEM for solving geometrically nonlinear problem]. Dis. kand. tekhn. nauk : Moskva, 1984. 215 p.

29. Crisfield M. An arc-length method including line searches and accelerations // *Computer methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1983. Vol. 19. Pp. 1269-1289.
30. Riks E. An incremental approach to the solution of snapping and buckling problems // *International Journal of Solids Structures*. 1979. No. 15. Pp. 529-551.
31. Walz J.E. Accuracy and convergence of finite element approximations. National Aeronautics And Space Administration Hampton Va Langley Research Center. 1968. Pp. 995-1027.
32. Pin T. The convergence of finite element method in solving linear elastic problems // *International Journal of Solids and Structures*. 1967. Vol. 5. Pp. 865-879.
33. Drabek P., Milota J. *Methods of Nonlinear Analysis: Applications to Differential Equations*. Springer Science & Business Media. 2007. 568 p.
34. Baum C.E. Energy Norms and 2-Norms // *Environmental and Space Electromagnetics*. Springer, Tokyo. 1991. doi:10.1007/978-4-431-68162-5\_49.
35. Tur A., Tur V., Lizahub A. An innovative approach to safety of non-linear analysis applied to structural robustness assessment // *Civil and Environmental Engineering*. 2018. No. 9. P. 137-141.
36. Siemens. Basic Nonlinear Analysis User's Guide. Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. [https://docs.plm.automation.siemens.com/data\\_services/resources/nxnastran/10/help/en\\_US/tdocExt/pdf/bas\\_nonlinear.pdf](https://docs.plm.automation.siemens.com/data_services/resources/nxnastran/10/help/en_US/tdocExt/pdf/bas_nonlinear.pdf) (Date of access : 08.01.2022).
37. Chacon R., Mirambell E., Real E. Influence of designer-assumed initial conditions on the numerical modelling of steel plate girders subjected to patch loading // *Thin-Walled Structures*. 2009. Vol. 47. P. 391-402.
38. Chacon R., Serrat M., Real E. The influence of structural imperfections on the resistance of plate girders to patch loading // *Thin-Walled Structures*. 2012. Vol. 53. Pp. 15-25. doi:10.1016/j.tws.2011.12.003.
39. Flores R. Resistance of Transversally Stiffened Hybrid Steel Plate Girders to Concentrated Loads. Doctoral Thesis .Barcelona, Polytechnic University of Catalonia, 2009. 221 p.
40. Gozzi J. Patch loading resistance of plated girders - ultimate and serviceability limit state: Doctoral Thesis. Sweden, Luleå University of Technology, 2007. 189 p.
41. Ruff D.C. Der Einfluss von Imperfektionen auf das Tragverhalten von Platten. *Stahlbau*. 1999. Vol. 68. Pp. 829-834.
42. Ruff D.C., Schulz U. Ergänzende Stellungnahme zum Einfluss von Imperfektionen auf das Tragverhalten von Platten // *Stahlbau*. 2000. Vol. 69(6). Pp. 503 - 527.
43. Rusch A., Lindner J. Tragfähigkeit von beulgefährdeten Querschnittselementen unter Berücksichtigung von Imperfektionen // *Stahlbau*. 2001. Vol. 70(10). Pp. 765-774.
44. Schmidt H. Stability of steel shell structures: General report // *Journal of Constructional Steel Research*. 2000. Vol. 55(1-3). Pp. 159-181.
45. Nadol'skij V.V. Neopredelennosti raschetnyh modelej soprotivleniya stal'nyh kon-strukcij [Uncertainties of calculated models of resistance of steel structures] // *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Polotsk State University]*. 2016. No. 8. Pp. 66-72.
46. Kuzhava Z. Statisticheskaya ocenka sluchajnyh nepravil'nostej real'nyh central'no – szhatyh stal'nyh sterzhnej [Statistical evaluation of random irregularities of real centrally compressed steel rods.] // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij [Construction mechanics and calculation of structures]*. 1982. No.5. Pp. 61-62.
47. Bjorhovde R. Columns: From Theory to Practice // *AISC Engineering Journal*. 1988. Vol. 25. Pp. 21-34.
48. Fukumoto Y. Evaluation of multiple column curves using the experimental data-base approach // *Journal of Constructional Steel Research*. 1983. Vol. 3. Pp. 2-19.

**Информация об авторе:**

**Надольский Виталий Валерьевич**

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технологии строительного производства».  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,  
доцент кафедры «Строительные конструкции».  
E-mail: [nadolskivv@gmail.ru](mailto:nadolskivv@gmail.ru)

**Information about author:**

**Nadolski Vitali V.**

Brest State Technical University, Brest, Belarus,  
candidate of technical science (PhD), docent, associated professor of the department of Building constructions.  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,  
associate Professor of the Department of «Building Structures».  
E-mail: [nadolskivv@mail.ru](mailto:nadolskivv@mail.ru)

Н.Л. ТИШКОВ<sup>1</sup>, А.Н. СТЕПАНЕНКО<sup>1</sup><sup>1</sup>Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

## РАБОТА СТАЛЬНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК С ТОНКОЙ НАКЛОННО-ГОФРИРОВАННОЙ СТЕНКОЙ

*Аннотация.* Эффективность применения поперечно-гофрированных балок может быть увеличена за счет наклона гофров на опорных участках их стенок. В работе приводятся результаты исследования напряженно-деформированного состояния стальных двутавровых балок с тонкой наклонно-гофрированной стенкой в зависимости от угла наклона образующих гофров к плоскости поперечного сечения балки. Представлены конечно-элементные модели балок с различными углами наклона образующих гофров (профиль гофров треугольный непрерывный открытый), а также результаты и краткий анализ численных экспериментов, проведенных при помощи программного комплекса ЛИРА-САПР. В ходе эксперимента для каждой модели получены формы потери устойчивости стенок с коэффициентами запаса, деформированные схемы и изополя распределения нормальных, касательных и главных напряжений в элементах балок. Представленные результаты свидетельствуют о дополнительном повышении устойчивости стенки при нисходящих гофрах, об изменении усилий в поясах балок и некотором повышении их деформативности.

**Ключевые слова:** металлическая двутавровая балка, тонкая наклонно-гофрированная стенка, треугольный профиль гофров, метод конечных элементов.

N.L. TISHKOV<sup>1</sup>, A.N. STEPANENKO<sup>1</sup><sup>1</sup>Pacific National University, Khabarovsk, Russia

## OPERATION OF STEEL I-BEAMS WITH THIN SLOPED-CORRULATED WALL

*Abstract.* The efficiency of the use of cross-corrugated beams can be increased by tilting the corrugations on the supporting sections of their walls. The paper presents the results of a study of the stress-strain state of steel I-beams with a thin inclined-corrugated wall, depending on the angle of inclination of the generatrix of the corrugations to the plane of the cross-section of the beam. The finite element models of beams with different inclination angles of the generating corrugations (corrugation profile triangular continuous open) are presented, as well as the results and a brief analysis of numerical experiments carried out using the software package LIRA-SAPR. In the course of the experiment, for each model, the forms of wall buckling with safety factors, deformed schemes and distribution isofields of normal, tangential and principal stresses in beam elements were obtained. The presented results indicate an additional increase in the stability of the wall with downward corrugations, a change in the forces in the chords of the beams, and a slight increase in their deformability.

**Keywords:** metal I-beam, thin inclined-corrugated wall, triangular corrugation profile, finite element method.

© Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., 2023

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев А.В., Лукин А.О., Алпатов В.Ю. Анализ эффективности применения двутаврового элемента с гофрированной стенкой при работе в сложном напряженно-деформированном состоянии // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 6. С. 27–30.

2. Дмитриева Т.Л., Уламбаяр Х. Использование балок с гофростенкой в современном проектировании // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2015. № 4 (15). С. 132–139.
3. Тишков Н.Л. Оценка экономической целесообразности применения арочных двутавровых стержней с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Вестник ТОГУ. 2017. №3(46). С. 103-108.
4. Брянцев А.А., Абсиметов В.Э., Лалин В.В. Эффективность применения двутавров с гофрированными стенками в производственных зданиях // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. №3 (54). С. 93-104.
5. Khalid Y.A., Chan C.L., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Bending behaviour of corrugated web beams // J. Mater. Process. Technol. 2004. No. 150(3). Pp. 242–254.
6. Abbas H.H., Sauce R., Driver, R.G. Analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane loads // Journal of Structural Engineering. 2007. Vol. 133, Issue 8. Pp. 347-355.
7. Митрофанов С.В., Митрофанов В.А. Работа балки с гофрированной стенкой с различными профилями гофрирования // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 9 (61). С. 87–92.
8. Elamary A., Saddek A.B., Alwetaishi M. Effect of corrugated web on flexural capacity of steel beams // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. Pp. 470–481.
9. Степаненко А.Н., Тишков Н.Л. Рекомендации по расчету стальных балок покрытий зданий из двутавра с тонкой волнистой стенкой. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2018. 60 с.
10. Denan F., Shoong K. K., Hashim N. S., Ken C. W. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior // Lecture Notes in Civil Engineering. 2019. No. 9. Pp. 463–472. doi:10.1007/978-981-10-8016-6\_38.
11. Макеев С.А., Силина Н.Г. Разработка методики уточненного расчета гофробалок на общую устойчивость // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 52–60. doi:10.33622/0869-7019.2020.12.52-60.
12. Al-Kannoon M.A., Suhail I.A. Experimentally Flexural Behaviour Study of Steel Beams with Corrugated Webs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 888. doi:10.1088/1757-899X/888/1/012084.
13. Arunakanthi E., Veera Praveen Reddy P. Analysis of trapezoidal corrugated steel web beams with different angle of inclination by ANSYS // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29 (3). Pp. 3413–3426.
14. Саиян С.Г., Паушкин А.Г. Численное параметрическое исследование напряженно-деформированного состояния двутавровых балок с различными типами гофрированных стенок // Вестник МГСУ. 2021. Т. 16. № 6. С. 676–687. doi:10.22227/1997-0935.2021.6.676-687.
15. Tishkov N.L., Stepanenko A.N. Improving the Efficiency of I-Beams with a Thin Transverse Corrugated Web Plate // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, Volume 1079, Chapter 1. doi:10.1088/1757-899X/1079/2/022077.
16. Холопов И.С., Лукин А.О., Козырев П.Н. Совершенствование конструкции балки с гофрированной стенкой // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Самара. 2015. С. 68-71.
17. Лукин А.О., Алпатов В.Ю., Чернышев Д.Д. Совершенствование конструктивного решения балки с гофрированной стенкой // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. № 2(23). С. 4-9. doi:10.17673/Vestnik.2016.02.1.
18. Тишков Н.Л., Степаненко А.Н., Шипелев И.Л., Устименко М.Б. Совершенствование конструкции стальной двутавровой балки с тонкой поперечно-гофрированной стенкой // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. № 22(2). С. 104-111. doi:10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111.
19. ЛИРА-САПР. Верификационный отчет. Том I. Москва, 2015. 51 с.
20. Степаненко А.Н., Тишков Н.Л. О дополнительных усилиях в поясах стальных балок с тонкими поперечно-гофрированными стенками // Вестник ТОГУ. Хабаровск, 2014. № 4(35). С. 49-52

## REFERENCES

1. Solov'yev A.V., Lukin A.O., Alpatov V.YU. Analiz effektivnosti primeneniya dvutavrovogo elementa s gofirovannoy stenкой pri rabote v slozhnom napryazhenno-deformirovannom sostoyanii [Analysis of the effectiveness of the use of an I-beam element with a corrugated wall when working in a complex stress-strain state] // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2010. No. 6. Pp. 27–30. (rus)
2. Dmitriyeva T.L., Ulambayar X. Ispol'zovaniye balok s gofrostenкой v sovremennoy proyektirovani [The use of beams with a corrugated wall in modern design. Izvestiya vuzov] // Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2015. No. 4(15). Pp. 132–139. (rus)
3. Tishkov N.L. Otsenka ekonomicheskoy tselesoobraznosti primeneniya arochnykh dvutavrovyykh stержney s tonкой poperechno-gofirovannoy stenкой [Evaluation of the economic feasibility of using arched I-beams with a thin transversely corrugated wall] // Vestnik TOGU. 2017. No. 3(46). Pp. 103-108. (rus)

4. Bryantsev A.A., Absimetov V.E., Lalin V.V. Effektivnost' primeneniya dvutavrov s gofriro-vannymi stenkami v proizvodstvennykh zdaniyakh [The effectiveness of the use of I-beams with corrugated walls in industrial buildings] // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy. 2017. No. 3(54). Pp. 93-104. (rus)
5. Khalid Y.A., Chan C.L., Sahari B.B., Hamouda A.M.S. Bending behaviour of corrugated web beams // J. Mater. Process. Technol. 2004. No. 150(3). Pp. 242–254.
6. Abbas H.H., Sauce R., Driver, R.G. Analysis of flange transverse bending of corrugated web I-girders under in-plane loads // Journal of Structural Engineering. 2007. Vol. 133. Issue 8. Pp. 347-355.
7. Mitrofanov S.V., Mitrofanov V.A. Rabota balki s gofrirovannoy stenкой s razlichnymi profilyami gofrirovaniya [Work of a beam with a corrugated wall with different corrugation profiles] // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. 2017. No. 9 (61). Pp. 87–92. (rus)
8. Elamary A., Saddek A.B., Alwetaishi M. Effect of corrugated web on flexural capacity of steel beams // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. Pp. 470–481.
9. Stepanenko A.N., Tishkov N.L. Rekomendatsii po raschetu stal'nykh balok pokrytiy zdaniy iz dvutavra s tonkoy volnistoy stenкой [Recommendations for the calculation of steel beams for roofing buildings from an I-beam with a thin wavy wall]. Khabarovsk : Izd-vo Tikhookean. gos. un-ta, 2018. 60 p. (rus)
10. Denan F., Shoong K. K., Hashim N. S., Ken C. W. Nonlinear analysis of triangular web profile steel section under bending behavior // Lecture Notes in Civil Engineering. 2019. No. 9. Pp. 463–472. doi:10.1007/978-981-10-8016-6\_38.
11. Makeyev S.A., Silina N.G. Razrabotka metodiki utochnennogo rascheta gofrobalok na ob-shchuyu ustoychivost' [Development of a methodology for the refined calculation of corrugated beams for overall stability] // Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2020. No. 12. Pp. 52–60. doi:10.33622/0869-7019.2020.12.52-60.
12. Al-Kannoon M.A., Suhel I.A. Experimentally Flexural Behaviour Study of Steel Beams with Corrugated Webs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 888. doi:10.1088/1757-899X/888/1/012084.
13. Arunakanthi E., Veera Praveen Reddy P. Analysis of trapezoidal corrugated steel web beams with different angle of inclination by ANSYS // International Journal of Advanced Science and Technology. 2020. Vol. 29 (3). Pp. 3413–3426.
14. Saiyan S.G., Paushkin A.G. Chislennoye parametricheskoye issledovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dvutavrovyykh balok s razlichnymi tipami gofrirovannykh stenok [Numerical parametric study of the stress-strain state of I-beams with various types of corrugated walls] // Vest-nik MGSU. 2021. Vol. 16. No.6. Pp. 676–687. doi:10.22227/1997-0935.2021.6.676-687. (rus)
15. Tishkov N.L., Stepanenko A.N. Improving the Efficiency of I-Beams with a Thin Transverse Corrugated Web Plate // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Volume 1079, Chapter 1. doi:10.1088/1757-899X/1079/2/022077.
16. Kholopov I.S., Lukin A.O., Kozyrev P.N. Sovershenstvovaniye konstruksii balki s gofiro-vannoy stenкой [Improving the design of a beam with a corrugated wall] // Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Samara. 2015. Pp. 68-71. (rus)
17. Lukin A.O., Alpatov V.YU., Chernyshev D.D. Sovershenstvovaniye konstruktivnogo resheniya balki s gofirovannoy stenкой [Improvement of the constructive solution of a beam with a corrugated wall] // Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura. 2016. No. 2(23). Pp. 4-9. doi:10.17673/Vestnik.2016.02.1. (rus)
18. Tishkov N.L., Stepanenko A.N., Shipilev I.L., Ustimenko M.B. Sovershenstvovaniye konstruksii stal'noy dvutavrovoy balki s tonkoy poperechno-gofrirovannoy stenкой [Improving the design of a steel I-beam with a thin transversely corrugated wall] // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2020. No. 22(2). Pp. 104-111. doi:10.31675/1607-1859-2020-22-2-104-111. (rus)
19. LIRA-SAPR. Verifikatsionnyy otchet [verification report]. Tom I. Moskva, 2015. 51 p.
20. Stepanenko A.N., Tishkov N.L. O dopolnitel'nykh usilyakh v poyasakh stal'nykh balok s ton-kimi poperechno-gofrirovannymi stenkami [On additional efforts in the belts of steel beams with thin transversely corrugated walls] // Vestnik TOGU. Khabarovsk, 2014. No. 4(35). Pp. 49-52. (rus)

### Информация об авторах:

#### **Тишков Николай Леонидович**

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск, Россия,  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство».  
E-mail: [n.tishkov87@gmail.com](mailto:n.tishkov87@gmail.com)

#### **Степаненко Анатолий Николаевич**

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск, Россия,  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Промышленное и гражданское строительство».  
E-mail: [000419@pnu.edu.ru](mailto:000419@pnu.edu.ru)

**Information about authors:**

**Tishkov Nikolay L.**

Pacific National University, Khabarovsk, Russia,

candidate in technical sciences, docent, associated professor of the department of Industrial and Civil Engineering.

E-mail: [n.tishkov87@gmail.com](mailto:n.tishkov87@gmail.com)

**Stepanenko Anatoliy N.**

Pacific National University, Khabarovsk, Russia,

doctor in technical sciences, docent, professor of the department of Industrial and Civil Engineering.

E-mail: [000419@pnu.edu.ru](mailto:000419@pnu.edu.ru)



С.А. СОЛОВЬЕВ<sup>1</sup>, А.Э. ИНЬКОВ<sup>1</sup>, А.А. СОЛОВЬЕВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», г. Вологда, Россия

## МЕТОД АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ИНТЕРВАЛЬНЫМ ОЦЕНКАМ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

**Аннотация.** В исследовании представлен подход к анализу надежности элементов строительных конструкций, основанный на интервальных оценках случайных величин, которые представляют собой границы их изменчивости. На численных примерах показано, что использование такого подхода при нелинейных математических моделях предельных состояний позволяет получить более осторожную оценку вероятности безотказной работы при снижении количества используемых статистических гипотез. Предложенный в статье подход использует неравенство Высочанского-Петунина для обоснования границ изменчивости случайных величин без использования гипотез о законе распределения случайной величины, а математическое ожидание и стандартное отклонение представлены также достоверными интервалами, что повышает практическую значимость разработанного метода. Алгоритмы использования предлагаемого подхода представлены на численных примерах оценок вероятности безотказной работы элементов строительных конструкций.

**Ключевые слова:** надежность, неравенство Высочанского-Петунина, вероятность безотказной работы, интервал, безопасность, случайная величина, стохастический анализ.

S.A. SOLOVEV<sup>1</sup>, A.E. INKOV<sup>1</sup>, A.A. SOLOVEVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vologda State University, Vologda, Russia

## METHOD OF STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS BASED ON INTERVAL ESTIMATES OF RANDOM VARIABLES

**Abstract.** The article presents an approach to structural reliability analysis based on interval estimates of random variables, which represent the boundaries of random variables' variability. Numerical examples show that the use of such an approach in cases with nonlinear mathematical models of limit states allow to obtain a more cautious estimate of the failure probability with a decrease in the number of statistical hypotheses used. The proposed approach uses the Vysochanskij-Petunin inequality to justify the limits of variability of random variables without using hypotheses about the distribution shape of a random variable. The mathematical expectation and standard deviation are also represented by confidence intervals which increases the practical significance of the developed method. Algorithms for using the proposed approach are presented on numerical examples of estimates of the no-failure probability of structural elements.

**Keywords:** reliability, Vysochanskij-Petunin inequality, failure probability, interval, safety, random variable, stochastic analysis.

© Соловьев С.А., Иньков А.Э., Соловьева А.А., 2023

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Du W., Ma J., Yue P., Gong Y. An Efficient Reliability Method with Multiple Shape Parameters Based on Radial Basis Function // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 19. P. 9689.

2. Zhou S., Zhang J., Zhang Q., Huang Y., Wen M. Uncertainty theory-based structural reliability analysis and design optimization under epistemic uncertainty // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 6. P. 2846.
3. Соловьев С.А., Соловьева А.А., Умнякова Н.П., Кочкин А.А. Анализ проблем оценки индекса надежности элементов строительных конструкций // *Жилищное строительство*. 2022. № 7. С. 32-39.
4. Li Q., Wang J., Su G. A Grasshopper Optimization Algorithm-Based Response Surface Method for Non-Probabilistic Structural Reliability Analysis with an Implicit Performance Function // *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 7. P. 1061.
5. Elishakoff I., Ben-Haim Y. *Convex Models of Uncertainty in Applied Mechanics* // Amsterdam: Elsevier. 1990. 240 p.
6. Sun W., Yang Z. A comprehensive model for structural non-probabilistic reliability and the key algorithms // *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2020. Vol. 123. No. 1. P. 309-332.
7. Jiang C., Li W. X., Han X., Liu L. X., Le P. H. Structural reliability analysis based on random distributions with interval parameters // *Computers & Structures*. 2011. Vol. 89. No. 23-24. P. 2292-2302.
8. Gao W., Wu D., Gao K., Chen X., Tin-Loi F. Structural reliability analysis with imprecise random and interval fields // *Applied Mathematical Modelling*. 2018. Vol. 55. P. 49-67.
9. Jiang C., Han X., Liu G.R., Li G.Y. The optimization of the variable binder force in U-shaped forming with uncertain friction coefficient // *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 182. No. 1-3. P. 262–267.
10. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
11. Li K., Liu H. Structural Reliability Analysis by Using Non-Probabilistic Multi-Cluster Ellipsoidal Model // *Entropy*. 2022. Vol. 24. No. 9. P. 1209.
12. Cao L., Liu J., Xie L., Jiang C., Bi R. Non-probabilistic polygonal convex set model for structural uncertainty quantification // *Applied Mathematical Modelling*. 2021. Vol. 89. P. 504-518.
13. Адишев В. В., Шмаков Д. С. Метод построения функции принадлежности с "прямой" обработкой исходных данных // *Труды НГАСУ*. 2013. Т. 16. № 2(56). С. 45-66.
14. Pradlwarter H.J. The use of kernel densities and confidence intervals to cope with insufficient data in validation experiments // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2008. Vol. 197. Pp. 2550–2560.
15. Уткин Л.В. Анализ риска и принятие решений при неполной информации. Санкт-Петербург : Наука, 2007. 404 с. ISBN 978-5-02-025187-8.
16. Уткин В.С., Шепелина Е.А. Расчет надежности оснований фундаментов по критерию прочности при ограниченной информации о нагрузке // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. № 1(36). С. 48-56. doi:10.5862/MCE.36.6.
17. Соловьев С.А., Иньков А.Э., Соловьева А.А. Метод расчета надежности шарнирно-стержневых систем при интервальной оценке случайных величин // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2022. № 3(302). С. 28-34. doi:10.37538/0069-2383.2022.3.28.34.
18. Соловьев С. А., Иньков А. Э., Соловьева А. А. Анализ надежности элементов стальных ферм при интервальной оценке случайных величин // *Вестник ВоГУ. Серия: технические науки*. 2022. № 1(15). С. 53-57.

## REFERENCES

1. Du W., Ma J., Yue P., Gong Y. An Efficient Reliability Method with Multiple Shape Parameters Based on Radial Basis Function. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 19. P. 9689.
2. Zhou S., Zhang J., Zhang Q., Huang Y., Wen M. Uncertainty theory-based structural reliability analysis and design optimization under epistemic uncertainty // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 6. P. 2846.
3. Solov'yev S.A., Solov'yeva A.A., Umnyakova N.P., Kochkin A.A. Analiz problem otsenki indeksa nadezhnosti elementov stroitel'nykh konstruktsiy [Analysis of the problems of assessing the reliability index of elements of building structures] // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2022. No. 7. Pp. 32-39. (rus).
4. Li Q., Wang J., Su G. A Grasshopper Optimization Algorithm-Based Response Surface Method for Non-Probabilistic Structural Reliability Analysis with an Implicit Performance Function // *Buildings*. 2022. Vol. 12. No. 7. P. 1061.
5. Elishakoff I., Ben-Haim Y. *Convex Models of Uncertainty in Applied Mechanics*. Amsterdam: Elsevier. 1990. 240 p.
6. Sun W., Yang Z. A comprehensive model for structural non-probabilistic reliability and the key algorithms // *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2020. Vol. 123. No. 1. Pp. 309-332.
7. Jiang C., Li W. X., Han X., Liu L. X., Le P. H. Structural reliability analysis based on random distributions with interval parameters // *Computers & Structures*. 2011. Vol. 89. No. 23-24. Pp. 2292-2302.
8. Gao W., Wu D., Gao K., Chen X., Tin-Loi F. Structural reliability analysis with imprecise random and interval fields // *Applied Mathematical Modelling*. 2018. Vol. 55. Pp. 49-67.
9. Jiang C., Han X., Liu G.R., Li G.Y. The optimization of the variable binder force in U-shaped forming with uncertain friction coefficient // *Journal of Materials Processing Technology*. 2007. Vol. 182. No. 1-3. Pp. 262–267.
10. Rzhnitsyn A.R. *Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktsiy na nadezhnost'* [Theory of calculation of building structures for reliability]. Moscow: Stroyizdat. 1978. 239 p. (rus).

11. Li K., Liu H. Structural Reliability Analysis by Using Non-Probabilistic Multi-Cluster Ellipsoidal Mode // *Entropy*. 2022. Vol. 24. No. 9. P. 1209.
12. Cao L., Liu J., Xie L., Jiang C., Bi R. Non-probabilistic polygonal convex set model for structural uncertainty quantification // *Applied Mathematical Modelling*. 2021. Vol. 89. Pp. 504-518.
13. Adishchev V. V., Shmakov D. S. Metod postroyeniya funktsii prinadlezhnosti s "pryamoy" obrabotkoy iskhodnykh dannykh [Method of constructing a membership function with "direct" processing of initial data] // *Trudy NGASU*. 2013. Vol. 16. No. 2(56). Pp. 45-66. (rus).
14. Pradlwarter H.J. The use of kernel densities and confidence intervals to cope with insufficient data in validation experiments // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 2008. Vol. 197. Pp. 2550–2560.
15. Utkin L.V. Analiz riska prinyatiya resheniy pri nepolnoy informatsii [Decision risk analysis with incomplete information] Sankt-Peterburg; Nauka. 2007. 404 p. ISBN 978-5-02-025187-8 (rus).
16. Utkin V.S., Shepelina E.A. Raschet nadezhnosti osnovaniy fundamentov po kriteriyu prochnosti pri ogranichennoy nagruzke na nagruzku [Calculation of the reliability of foundation beds according to the strength criterion with limited information about the load] // *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 1(36). Pp. 48-56. doi:10.5862/MCE.36.6 (rus).
17. Solov'yev S.A., In'kov A.E., Solov'yeva A.A. Metod rascheta nadezhnosti sharnirno-sterzhnevnykh sistem pri interval'noy otsenke sluchaynykh velichin [A method for structural reliability analysis of trusses with interval uncertainty of random variables] // *Stroitel'naya mekhanika i raschet nablyudeniya*. 2022. No. 3(302). Pp. 28-34. doi:10.37538/0069-2383.2022.3.28.34. (rus).
18. Solov'yev S.A., In'kov A.E., Solov'yeva A.A. Analiz nadezhnosti elementov stal'nykh ferm pri interval'noy otsenke sluchaynykh velichin [Steel trusses elements reliability analysis based on random variables interval estimation] // *Vestnik VoGU. Seriya: tekhnicheskiye nauki*. 2022. No. 1(15). Pp. 53-57. (rus).

**Информация об авторах:**

**Соловьев Сергей Александрович**

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия,  
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства.  
E-mail: [solovevsa@vogu35.ru](mailto:solovevsa@vogu35.ru)

**Иньков Александр Эдуардович**

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия,  
аспирант, ассистент кафедры промышленного и гражданского строительства.  
E-mail: [inkovae@vogu35.ru](mailto:inkovae@vogu35.ru)

**Соловьева Анастасия Андреевна**

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет» (ВоГУ), г. Вологда, Россия,  
аспирант, преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства.  
E-mail: [solovevaaa@vogu35.ru](mailto:solovevaaa@vogu35.ru)

**Information about authors:**

**Solovyev Sergey Al.**

Vologda State University, Vologda, Russia,  
candidate of technical sciences, associate professor of the industrial and civil construction department.  
E-mail: [solovevsa@vogu35.ru](mailto:solovevsa@vogu35.ru)

**Inkov Alexander Ed.**

Vologda State University, Vologda, Russia,  
assistant, post-graduate student the industrial and civil construction department.  
E-mail: [inkovae@vogu35.ru](mailto:inkovae@vogu35.ru)

**Solovyeva Anastasia An.**

Vologda State University, Vologda, Russia,  
lecturer, post-graduate student the industrial and civil construction department.  
E-mail: [solovevsa@vogu35.ru](mailto:solovevsa@vogu35.ru)

A.V. TUR<sup>1</sup>, V.V TUR<sup>1</sup>, A.A. LIZAHUB<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Brest State Technical University, Brest, Belarus

## EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF THE REINFORCED CONCRETE FLAT SLABS WITH THE CENTRAL SUPPORT LOSS

**Abstract.** *The paper experimentally and theoretically considers the issues of assessing the robustness of reinforced concrete structural systems with flat slabs in an accidental design situation.*

*The methodology of experimental studies for two scale models of a flat slab fragment in the case of removal of the central support under static (sample FS-1) and dynamic (sample FS-2) loading are presented. Based on the data obtained, the analysis of the main mechanisms of resistance of flat slabs to progressive collapse was carried out.*

*The article presents a theoretical approach to a direct quantitative assessment of robustness, which is based on the provisions of the energy balance of a damaged structural system in an accidental design situation. The proposed solutions make it possible to determine the non-linear quasi-static "load-displacement" reaction and the ultimate dynamic resistance for reinforced concrete structural systems with flat slabs in the case of removal of the vertical key element.*

**Keywords:** *flat slab, robustness, resistance mechanism, membrane action, dynamic resistance, energy balance method.*

В.В. ТУР<sup>1</sup>, А.В. ТУР<sup>1</sup>, А.А. ЛИЗОГУБ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛОСКИХ ПЕРЕКРЫТИЙ ПРИ УДАЛЕНИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОПОРЫ

**Аннотация.** *В работе экспериментально и теоретически рассмотрены вопросы оценки живучести железобетонных конструктивных систем с плоскими дисками перекрытий в особой расчетной ситуации.*

*Представлена методика проведения экспериментальных исследований для двух масштабных моделей фрагмента плоского перекрытия в случае удаления центральной опоры при статическом (образец FS-1) и динамическом (образец FS-2) нагружениях. На основании полученных данных выполнен анализ основных механизмов сопротивления плоских дисков перекрытия прогрессирующему обрушению.*

*В статье представлен теоретический подход прямой количественной оценки живучести, который основан на положениях энергетического баланса поврежденной конструктивной системы в особой расчетной ситуации. Предложенные решения позволяют определить нелинейную квазистатическую реакцию «нагрузка-перемещение» и величину предельного динамического сопротивления для железобетонных конструктивных систем с плоскими дисками перекрытий в случае удаления вертикального ключевого элемента.*

**Ключевые слова:** *плоское перекрытие, живучесть, механизм сопротивления, мембранный эффект, динамическое сопротивление, поврежденная система, энергетический баланс.*

© Тур В.В., Тур А.В., Лизогуб А.А., 2023

### REFERENCES

1. Chen Z., Zhu Y., Lu X., Lin K. A simplified method for quantifying the progressive collapse fragility of multi-story RC frames in China. *Engineering Failure Analysis*. 2023. Vol. 143. doi:10.1016/j.engfailanal.2022.106924

2. Ellingwood B R., Smilowitz R., Dusenberry D.O., Duthinh D., Lew H.S., Carino N.J. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. NISTIR 7396. National Institute of Science and Technology, US Department of Commerce. 2007. 194 p.
3. Herraiz B., Vogel T., Russell J. Energy-based method for sudden column failure scenarios: theoretical, numerical and experimental analysis. In IABSE Workshop Helsinki 2015: Safety, Robustness and Condition Assessment of Structures. Report. International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE. 2015. Pp. 70-77. doi:<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010389549>
4. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework. *Engineering structures*. 2008. Vol. 30. No. 5. Pp. 1308-1318. doi:10.1016/j.engstruct.2007.07.011
5. Qian K., Li B. Research advances in design of structures to resist progressive collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2015. Vol. 29. No. 5. B4014007. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000698
6. Fedorova N.V., Savin S.Y. Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage-an analytical review. *Building and Reconstruction*. 2021. Vol. 95. No. 3. Pp. 76-108. doi:10.33979/2073-7416-2021-95-3-76-108
7. Tur V., Tur A., Lizahub A. Simplified analytical method for the robustness assessment of precast reinforced concrete structural systems. *Budownictwo i Architektura*. 2021. Vol. 20. No. 4. Pp. 93-114. doi:10.35784/bud-arch.2774
8. ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers. 2005.
9. British Standard BS 8110-11. The structural use of concrete in building – Part 1: Code of practice for design and construction. London, U.K. 1997.
10. DoD UFC Guidelines. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-03. Department of Defense (DoD). 2005.
11. European Committee for Standardization. Eurocode 1 - EN 1991-1-7: Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions. 2006.
12. General Service Administration (GSA). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. Washington (DC). 2003.
13. SN 2.01.01-2022. Osnovy proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij [Basics of design of building structures]. Minsk. 2022. (In Russian)
14. SP 5.03.01-2020. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii [Concrete and reinforced concrete structures]. Minsk. 2020. (In Russian)
15. Androsova N.B., Vetrova O.A. Analiz issledovaniy i trebovaniy po zashchite zdaniy i sooruzheniy ot progressiruyushchego obrusheniya v zakonadatel'no-normativnyh dokumentah Rossii i stranah Evrosoyuza [The analysis of studies and requirements for the protection of buildings and structures against progressive collapse in regulatory documents of Russia and the European union]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2019. Vol. 1. Pp. 85-96. (In Russian). <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-85-96>
16. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu, X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*. 2018. Vol. 173. Pp. 122-149. doi:10.1016/j.engstruct.2018.06.082
17. Tohidi M. Effect of floor-to-floor joint design on the robustness of precast concrete cross wall buildings (Doctoral dissertation, University of Birmingham). 2015.
18. Dat P.X., Tan K.H. Experimental study of beam–slab substructures subjected to a penultimate-internal column loss. *Engineering Structures*. 2013. Vol. 55. Pp: 2-15. doi:10.1016/j.engstruct.2013.03.026
19. Dat P.X., Tan K.H. Experimental response of beam-slab substructures subject to penultimate-external column removal. *Journal of Structural Engineering*. 2015. Vol. 141. No. 7. Pp. 1-12. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001123
20. Lim N.S., Tan K.H., Lee C.K. Experimental studies of 3D RC substructures under exterior and corner column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2017. Vol. 150. Pp. 409-427. doi:10.1016/j.engstruct.2017.07.041
21. Pham A.T., Lim N.S., Tan K.H. Investigations of tensile membrane action in beam-slab systems under progressive collapse subject to different loading configurations and boundary conditions. *Engineering Structures*. 2017. Vol. 150. Pp. 520-536. doi:10.1016/j.engstruct.2017.07.060
22. Ren P., Li Y., Lu X., Guan H., Zhou Y. Experimental investigation of progressive collapse resistance of one-way reinforced concrete beam–slab substructures under a middle-column-removal scenario. *Engineering Structures*. 2016. Vol. 118. Pp. 28-40. doi:10.1016/j.engstruct.2016.03.051
23. Wieczorek M. Influence of amount and arrangement of reinforcement on the mechanism of destruction of the corner part of a slab-column structure. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 57. Pp. 1260-1268. doi:10.1016/j.proeng.2013.04.159
24. Kolchunov V.I., Osovskikh Ye.V., Al'kadi S.A. Eksperimental'nyye issledovaniya fragmenta karkasa mnogoetazhnogo zdaniya s zhelezobetonnyimi elementami sostavnogo secheniya [Experimental studies of a fragment of a high-rise building frame with reinforced concrete elements of a composite section]. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No. 6. Pp. 13-21. (In Russian)

25. Ma F., Gilbert B.P., Guan H., Xue H., Lu X., Li Y. Experimental study on the progressive collapse behaviour of RC flat plate substructures subjected to corner column removal scenarios. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 180. Pp. 728-741. doi:10.1016/j.engstruct.2018.11.043
26. Pang B., Wang F., Yang J., Nyunn S., Azim I. Performance of slabs in reinforced concrete structures to resist progressive collapse. In *Structures*. Elsevier. 2021. Vol. 33. Pp. 4843-4856. doi:10.1016/j.istruc.2021.04.092
27. Qian K., Li B. Slab effects on response of reinforced concrete substructures after loss of corner column. *ACI Structural Journal*. 2012. Vol. 109. No. 6. Pp. 845-855.
28. Qian K., Li B., Ma J.X. Load-carrying mechanism to resist progressive collapse of RC buildings. *J. Struct. Eng.*, 2015. Vol. 141. No. 2. Pp. 1-14. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001046
29. Russell J.M., Owen J.S., Hajirasouliha I. Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss. *Engineering Structures*. 2015. Vol. 99. Pp. 28-41. doi:10.1016/j.engstruct.2015.04.040
30. Yi W.J., Zhang F.Z., Kunnath S.K. Progressive collapse performance of RC flat plate frame structures. *Journal of Structural Engineering*. 2014. Vol. 140. No. 9. Pp. 1-10. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000963
31. International Standard Organization. ISO 2394: General principles on reliability for structures, Fourth ed. Genève, Switzerland. 2015.
32. Preece B.W., Davis D.D. Modelirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij [Modeling of reinforced concrete structures]. Minsk: The highest school. 1974. 224 p. (In Russian)
33. GOST 10180-2012. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nym obrazcam [Concretes. Methods for strength determination using reference specimens]. Minsk. 2015. (In Russian)
34. GOST 24452-80. Metody opredeleniya prizmennoj prochnosti, modulya uprugosti i koeficienta Puassona [Concretes. Methods of prismatic, compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination]. (In Russian)
35. GOST 12004-81. Stal' armaturnaya. Metody ispytaniya na rastyazhenie [Reinforcing-bar steel. Tensile test methods]. 2011. (In Russian)
36. *fib* Bulletin 43: Structural connections for precast concrete buildings. Guide to good practice. 2008.
37. *fib* Bulletin 72. Bond and anchorage of embedded reinforcement: Background to the fib Model Code for Concrete Structures 2010: Technical report. *fib*-Fédération internationale du béton. 2014.
38. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells, 2nd ed. New York City, United States of America: McGraw-Hill. 1987. 580 p.
39. Kennedy G., Goodchild C.H. Practical yield line design. Concrete Centre, Surrey, UK., 2004. 171 p.
40. *fib* Model Code for Concrete Structures 2010. International Federation for Structural Concrete (*fib*), Lausanne, Switzerland. 2010.
41. Micallef K., Sagaseta J., Ruiz M.F., Muttoni A. Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2014. Vol. 71. Pp. 17-33. doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.04.003
42. Muttoni A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. *ACI structural Journal*. 2008. Vol. 105. Pp. 440-450. doi:10.14359/19858

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen Z., Zhu Y., Lu X., Lin K. A simplified method for quantifying the progressive collapse fragility of multi-story RC frames in China // *Engineering Failure Analysis*. 2023. № 143. doi:10.1016/j.engfailanal.2022.106924
2. Ellingwood B R., Smilowitz R., Dusenberry D.O., Duthinh D., Lew H.S., Carino N.J. Best practices for reducing the potential for progressive collapse in buildings. NISTIR 7396. National Institute of Science and Technology, US Department of Commerce. 2007. 194 c.
3. Herraiz B., Vogel T., Russell J. Energy-based method for sudden column failure scenarios: theoretical, numerical and experimental analysis. In IABSE Workshop Helsinki 2015: Safety, Robustness and Condition Assessment of Structures. Report. International Association for Bridge and Structural Engineering IABSE. 2015. С. 70-77. doi: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010389549>
4. Izzuddin B.A., Vlassis A.G., Elghazouli A.Y., Nethercot D.A. Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss—Part I: Simplified assessment framework // *Engineering structures*. 2008. №30 (5). С. 1308-1318. doi:10.1016/j.engstruct.2007.07.011
5. Qian K., Li B. Research advances in design of structures to resist progressive collapse // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2015. №2 9 (5). В4014007. doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000698
6. Федорова Н.В., Савин С.Ю. Анализ особенностей сопротивления прогрессирующему обрушению конструктивных систем зданий и сооружений при внезапных структурных перестройках: аналитический обзор научных исследований // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 3. С. 76-108. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-76-108>
7. Tur V., Tur A., Lizahub A. Simplified analytical method for the robustness assessment of precast reinforced concrete structural systems // *Budownictwo i Architektura*. 2021. № 20 (4). С. 93-114. doi:10.35784/bud-arch.2774
8. ASCE. Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers. 2005.

9. British Standard BS 8110-11. The structural use of concrete in building – Part 1: Code of practice for design and construction. London, U.K. 1997.
10. DoD UFC Guidelines. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse, Unified Facilities Criteria (UFC) 4-023-03. Department of Defense (DoD). 2005.
11. European Committee for Standardization. Eurocode 1 - EN 1991-1-7: Actions on structures - Part 1-7: General actions - Accidental actions. 2006.
12. General Service Administration (GSA). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects. Washington (DC). 2003.
13. СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. Минск. 2022.
14. СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. Минск. 2020.
15. Андросова Н.Б., Ветрова О.А. Анализ исследований и требований по защите зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения в законодательно-нормативных документах России и странах Евросоюза // Строительство и реконструкция. 2019. № 1. С. 85-96. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-81-1-85-96>
16. Adam J.M., Parisi F., Sagaseta J., Lu, X. Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century // Engineering Structures. 2018. № 173. С. 122-149. doi:10.1016/j.engstruct.2018.06.082
17. Tohidi M. Effect of floor-to-floor joint design on the robustness of precast concrete cross wall buildings (Doctoral dissertation, University of Birmingham). 2015.
18. Dat P.X., Tan K.H. Experimental study of beam–slab substructures subjected to a penultimate-internal column loss // Engineering Structures. 2013. № 55. С. 2-15. doi:10.1016/j.engstruct.2013.03.026
19. Dat P.X., Tan K.H. Experimental response of beam-slab substructures subject to penultimate-external column removal // Journal of Structural Engineering. 2015. №141 (7). С. 1-12. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001123
20. Lim N.S., Tan K.H., Lee C.K. Experimental studies of 3D RC substructures under exterior and corner column removal scenarios // Engineering Structures. 2017. № 150. С. 409-427. doi:10.1016/j.engstruct.2017.07.041
21. Pham A.T., Lim N.S., Tan K.H. Investigations of tensile membrane action in beam-slab systems under progressive collapse subject to different loading configurations and boundary conditions // Engineering Structures. 2017. № 150. С. 520-536. doi:10.1016/j.engstruct.2017.07.060
22. Ren P., Li Y., Lu X., Guan H., Zhou Y. Experimental investigation of progressive collapse resistance of one-way reinforced concrete beam–slab substructures under a middle-column-removal scenario // Engineering Structures. 2016. № 118. С. 28-40. doi:10.1016/j.engstruct.2016.03.051
23. Wicczorek M. Influence of amount and arrangement of reinforcement on the mechanism of destruction of the corner part of a slab-column structure // Procedia Engineering. 2013. № 57. С. 1260-1268. doi:10.1016/j.proeng.2013.04.159
24. Колчунов В.И., Осовских Е.В., Алькади С.А. Экспериментальные исследования фрагмента каркаса многоэтажного здания с железобетонными элементами составного сечения // Строительство и реконструкция. 2016. № 6. С. 13-21.
25. Ma F., Gilbert B.P., Guan H., Xue H., Lu X., Li Y. Experimental study on the progressive collapse behaviour of RC flat plate substructures subjected to corner column removal scenarios // Engineering Structures. 2019. №180. С. 728-741. doi:10.1016/j.engstruct.2018.11.043
26. Pang B., Wang F., Yang J., Nyunn S., Azim I. Performance of slabs in reinforced concrete structures to resist progressive collapse. In Structures. Elsevier. 2021. № 33. С. 4843-4856. doi:10.1016/j.istruc.2021.04.092
27. Qian K., Li B. Slab effects on response of reinforced concrete substructures after loss of corner column // ACI Structural Journal. 2012. №109 (6). С. 845-855.
28. Qian K., Li B., Ma J.X. Load-carrying mechanism to resist progressive collapse of RC buildings // J. Struct. Eng. 2015. №141 (2) С. 1-14. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001046
29. Russell J.M., Owen J.S., Hajirasouliha I. Experimental investigation on the dynamic response of RC flat slabs after a sudden column loss // Engineering Structures. 2015. № 99. С. 28-41. doi:10.1016/j.engstruct.2015.04.040
30. Yi W.J., Zhang F.Z., Kunnath S.K. Progressive collapse performance of RC flat plate frame structures // Journal of Structural Engineering. 2014. № 140 (9). С. 1-10. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000963
31. International Standard Organization. ISO 2394: General principles on reliability for structures, Fourth ed. Genève, Switzerland. 2015.
32. Прис Б.В., Дэвис Д.Д. Моделирование железобетонных конструкций. Минск: «Вышэйш. школа». 1974. 224 с.
33. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Минск. 2015.
34. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.
35. ГОСТ 12004-81. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение [Reinforcing-bar steel. Tensile test methods]. 2011.
36. *fib* Bulletin 43: Structural connections for precast concrete buildings. Guide to good practice. 2008.
37. *fib* Bulletin 72. Bond and anchorage of embedded reinforcement: Background to the fib Model Code for Concrete Structures 2010: Technical report. *fib*-Fédération internationale du béton. 2014.

38. Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. Theory of Plates and Shells, 2nd ed. New York City, United States of America: McGraw-Hill. 1987. 580 с.
39. Kennedy G., Goodchild C.H. Practical yield line design. Concrete Centre, Surrey, UK., 2004. 171 p.
40. *fib* Model Code for Concrete Structures 2010. International Federation for Structural Concrete (*fib*), Lausanne, Switzerland. 2010.
41. Micallef K., Sagaseta J., Ruiz M.F., Muttoni A. Assessing punching shear failure in reinforced concrete flat slabs subjected to localised impact loading // International Journal of Impact Engineering. 2014. № 71. С. 17-33. doi:10.1016/j.ijimpeng.2014.04.003
42. Muttoni A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement // ACI structural Journal. 2008. № 105 С. 440-450. doi:10.14359/19858

**Information about authors:**

**Tur Viktor V.**

Brest State Technical University, Brest, Belarus,  
doctor of technical sciences, Professor, Head the Department of Concrete Technology and Construction Materials.  
E-mail: [profturvic@gmail.com](mailto:profturvic@gmail.com)

**Tur Andrei V.**

Brest State Technical University, Brest, Belarus,  
PhD, Associate Professor, Head the Department of Architecture.  
E-mail: [aturphd@gmail.com](mailto:aturphd@gmail.com)

**Lizahub Aliaksandr Al.**

Brest State Technical University, Brest, Belarus,  
master of eng. science, junior research fellow of BL «RCIC».  
E-mail: [p\\_332\\_14lizogub@mail.ru](mailto:p_332_14lizogub@mail.ru)

**Информация об авторах:**

**Тур Виктор Владимирович**

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,  
заслуженный работник образования РБ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
технологии бетона и строительных материалов.  
E-mail: [profturvic@gmail.com](mailto:profturvic@gmail.com)

**Тур Андрей Викторович**

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры.  
E-mail: [aturphd@gmail.com](mailto:aturphd@gmail.com)

**Лизогуб Александр Александрович**

УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь,  
м.т.н., младший научный сотрудник ОЛ «НИЦИС».  
E-mail: [p\\_332\\_14lizogub@mail.ru](mailto:p_332_14lizogub@mail.ru)



А.И. БЕДОВ<sup>1</sup>, В.А. РЯЗАНОВА<sup>2</sup>, А.И. ГАБИТОВ<sup>2</sup>,  
А.С. САЛОВ<sup>2</sup>, Д.Р. ИСЛАМГАЛИЕВА<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия

## ВАРИАНТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНДАМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

*Аннотация.* В статье рассмотрено вариантное проектирование фундаментов для различных регионов Российской Федерации. Для здания многофункционального спортивного комплекса выполнен расчёт свайного фундамента с учётом особенностей гидрогеологических условий рассматриваемых регионов. Моделирование пространственной рамы выполнено с применением программных комплексов SCAD и Autodesk AutoCAD. По расчёту для Республики Башкортостан приняты сваи по серии С-5-30 длиной 5 м сечением 300x300 мм. Для Республики Татарстан: сваи по серии С-3-30 длиной 3 м сечением 300x300 мм. Для Пермского края приняты сваи по серии С-6-50 длиной 6 м сечением 500x500 мм. Для определения стоимости возведения фундаментов составлен локально-сметный расчёт на основе ведомостей объемов работ. По представленной окончательной стоимости делается вывод о том, что различные категории сложности инженерно-геологических условий подразумевают проведение дополнительных мероприятий в районах с более сложной гидрогеологической обстановкой. Стоимость возведения фундамента для Республики Башкортостан составила 93,711 млн. руб и оказалась наибольшей по сравнению с другими регионами, что связано со значительным увеличением объёмов работ за счёт устройства монолитных железобетонных поясов. Авторами отмечено, что в выборе конструкций фундамента проектируемого здания определяющим фактором является анализ инженерно-геологических условий площадки строительства. Представленная методика позволяет провести технико-экономическую оценку строительства аналогичных промышленных и общественных зданий не только в рассмотренных регионах, но и на всей территории Российской Федерации.

**Ключевые слова:** свайный фундамент, вариантное проектирование, гидрогеологические условия, площадка строительства, локально-сметный расчет, технико-экономические показатели, анализ.

A.I. BEDOV<sup>1</sup>, V.A. RYAZANOVA<sup>2</sup>, A.I. GABITOV<sup>2</sup>,  
A.S. SALOV<sup>2</sup>, D.R. ISLAMGALIEVA<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

## VARIOUS FOUNDATION DESIGN FOR INDUSTRIAL AND PUBLIC BUILDINGS WITH DIFFERENT HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS

**Abstract.** The article considers the various foundation design for different regions of the Russian Federation. The calculation of the pile foundation was carried out taking into account the peculiarities of hydrogeological conditions in these regions for the multifunctional sport complex. The spatial frame modeling was performed using SCAD and Autodesk AutoCAD software packages. According the calculation S-5-30 5 m long with a section of 300x300 mm (by series) piles received for the Republic of Bashkortostan. For the Republic of Tatarstan: piles according to the S-3-30 series, 3 m long, with a section of 300x300 mm. According to the S-6-50 series, 6 m long, with a section of 500x500 mm piles are accepted for the Perm Territory. To define the price of building foundations, a local estimate calculation

*was composed based on bills of quantities. Based on the presented final price, it can be concluded that different categories of engineering and geological conditions complexity, imply additional activities in areas with more complex hydrogeological conditions. The cost of building the foundation for the Republic of Bashkortostan amounted to 93.711 million rubles, and turned out to be the largest in comparison with other regions, which is associated with a significant increase in the volume of work due to the installation of monolithic reinforced concrete belts. The authors noted, that analysis of engineering and geological conditions of the construction site is the determining factor in the choice of foundation structures for the designed building. The presented methodology allows to carry out a similar industrial and public buildings feasibility study in construction not only in the considered regions but throughout the Russian Federation.*

**Keywords:** *pile foundation, various design, hydrogeological conditions, construction site, local cost estimate, feasibility study, analysis.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цытович Н.А., Веселов В.А., Кузьмин П.Г. Основания и фундаменты. Под ред. чл.-корр. АН СССР проф. Н.А. Цытовича. Москва: Госстройиздат, 1959. 452 с.
2. Алексеев А.Г., Сазонов П.М., Поверенный Ю.С., Зеленин Д.А., Фефелов А.В., Саитов А.В. Усовершенствование конструкции стальных свай в многолетнемерзлых грунтах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 1. С. 34-38. doi:10.33622/0869-7019.2022.01.34-38.
3. Чунюк Д.Ю., Коптева О.В. Переводные коэффициенты для модуля деформации песчаных грунтов // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 9. С. 71-75. doi:10.33622/0869-7019.2019.09.71-75.
4. Шевченко А.В., Давидюк А.А., Баглаев Н.Н. Метод итераций для расчета железобетонных элементов на основе нелинейной деформационной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 3. С. 13-18. doi:10.33622/0869-7019.2022.03.13-18.
5. Габитов А.И., Семенов А.А. Железобетонные конструкции. Курсовое и дипломное проектирование с использованием программного комплекса SCAD // Учебное пособие. М.: Изд-во СКАД СОФТ, Издательство АСВ, 2011. 280 с.
6. Бедов А.И., Бабков В.В., Габитов А.И., Салов А.С. Использование бетонов и арматуры повышенной прочности в проектировании сборных и монолитных железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 76-84.
7. Алексеев А.Г., Безволев С.Г., Сазонов П.М., Звездов А.А. О необходимости исследований работы винтовых свай и актуализации норм проектирования свайно-винтовых фундаментов // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 1. С. 43-47.
8. Бедов А.И., Знаменский В.В., Габитов А.И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. Часть 1. Обследование и оценка технического состояния оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. М: Изд-во АСВ, 2021 (2014, 2016). 704 с.
9. Бедов А.И., Габитов А.И., Знаменский В.В. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. В 2-х частях. Ч.II. Восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. Под ред. А.И. Бедова: Учеб.пос. М: АСВ, 2021 (2017). 924 с.
10. Бедов А.И., Бабков В.В., Габитов А.И., Сахибгареев Р.Р., Салов А.С. Исследование свойств модифицированных бетонов с химическими добавками // В сборнике: Бетон и железобетон - взгляд в будущее. Научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. 2014. С. 14-25.
11. Гусев Б.В., Файвусович А.С., Рязанова В.А. Развитие фронта коррозии бетона в агрессивных средах // Бетон и железобетон. 2005. № 5. С. 23-28.
12. Бабков В.В., Салов А.С., Плакс А.А., Колесник Г.С., Сахибгареев Р.Р. Вопросы эффективности применения высокопрочных бетонов в железобетонных конструкциях // Жилищное строительство. 2009. № 10. С. 43.
13. Веселов В.А. Проектирование оснований и фундаментов. Основы теории и примеры расчета. М.: Изд-во Стройиздат, 1990. 304 с.
14. Мухаметзянов З.Р., Разяпов Р.В. Классификация комбинаций технологически взаимосвязанных строительных процессов, используемых при строительстве объекта // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 10. С. 72-77.
15. Bedov A., Salov A., Gabitov A. Cad methods of structural solutions for reinforced concrete frame // XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering "Construction - The Formation of Living Environment" (FORM 2018), Moscow, Russian Federation. 2018. Vol. 365. Pp. 1-8.
16. Krot A., Ryazanova V., Gabitov A., Salov A., Rolnik L. Resource-saving technologies for advanced concrete in the Republic of Bashkortostan // MATEC Web of Conferences 7. "7th International Scientific Conference

"Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Transbud 2018) 2018. Vol. 230. Article number 03009.

17. Мухаметзянов З.Р., Разяпов Р.В. Разработка организационных решений на основе технологического взаимодействия между строительными работами и процессами // Научный журнал строительства и архитектуры. 2018. № 1(49). С. 65–71.

18. Ластовка А.В., Данченко Т.В., Клиндух Н.Ю., Берсенева М.Л. Методы расчета ленточного фундамента на упругом грунтовом основании // Вестник Евразийской науки. 2019. № 3. URL: <https://esj.today/PDF/58SAVN319.pdf>

19. Синицин Д.А., Бабков В.В., Сахибгареев Р.Р., Сахибгареев Р.Р., Резвова В.П. Применение самоуплотняющихся бетонных смесей в практике строительства Республики Башкортостан // Строительные материалы. 2019. № 12. С. 45-51.

20. Mukhametzyanov Z.R. Modeling of construction technology of objects on the basis of technological interaction of works // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 451. № 012077. doi:10.1088/1757-899X/451/1/012077.

21. Носков И.В., Решетов М.М., Лютов В.Н., Ананьев С.А., Носков К.И. Причины снижения и определение прочности бетона фундаментов методами разрушающего и неразрушающего контроля при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений // Вестник Евразийской науки. 2020. № 6. URL: <https://esj.today/PDF/04SAVN620.pdf>

## REFERENCES

1. Tsytoich N.A., Veselov V.A., Kuzmin P.G. Foundation engineering. Edited by chl.-corr. Academy of Sciences of the USSR prof. N. A. Tsytoich. - Moscow: Gosstroyizdat, 1959. 452 p.

2. Alekseev A.G., Sazonov P.M., Attorney Yu.S., Zelenin D.A., Fefelov A.V., Saitov A.V. Improving the design of steel piles in permafrost soils // Industrial and civil construction. 2022. No. 1. Pp. 34-38. doi:10.33622/0869-7019.2022.01.34-38.

3. Chunyuk D.Y., Kopteva O.V. Conversion coefficients for the modulus of deformation of sandy soils // Industrial and civil construction. 2019. No. 9. Pp. 71-75. doi:10.33622/0869-7019.2019.09.71-75.

4. Shevchenko A.V., Davidyuk A.A., Baglaev N.N. The iteration method for calculating reinforced concrete elements based on a nonlinear deformation model // Industrial and civil construction. 2022. No. 3. Pp. 13-18. doi:10.33622/0869-7019.2022.03.13-18.

5. Vinnichenko V., Gabitov A., Salov A., Gaisin A., Kuznetsov D The heat loss calculating methods of external walls in the buildings reconstruction // MATEC Web of Conferences 7. "7th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Transbud 2018) 2018. Vol. 230. Article number 02038.

6. Bedov A.I., Babkov V.V., Gabitov A.I., Salov A.S. Use of heavy duty concretes and reinforcement in design of prefabricated and monolithic reinforced concrete structures // Vestnik MGSU. 2012. No. 8. Pp. 76-84.

7. Alekseev A.G., Bezzolev S.G., Sazonov P.M., Zvezdov A.A. On the need to study the operation of screw piles and update the design standards for pile-screw foundations // Industrial and civil construction. 2018. No. 1. Pp. 43-47.

8. Bedov A.I., Znamensky V.V., Gabitov A.I. Assessment of the technical condition, restoration and strengthening of the foundations of building structures of operated buildings and structures. Part 1. Inspection and assessment of the technical condition of the foundations and building structures of operated buildings and structures. Moscow, ASV Publ., 2021(2014, 2016). 704 p.

9. Bedov A.I., Gabitov A.I., Znamensky V.V. Assessment of the technical condition, restoration and strengthening of the foundations of building structures of operated buildings and structures. Part 2. Restoration and strengthening of foundations and building structures of operated buildings and structures. Ed. A.I. Bedova: Educational settlement. M: ASV, 2021 (2017). 924 p.

10. Bedov A.I., Babkov V.V., Gabitov A.I., Sakhibgareev R.R., Salov A.S. Investigation of modified concrete with chemical additives // In the collection: Concrete and reinforced concrete - a look into the future. Scientific works of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete: in 7 volumes. 2014. Pp. 14-25.

11. Gusev B.V., Faivusovich A.S., Ryazanova V.A. Development of the corrosion front of concrete in aggressive environments // Concrete and reinforced concrete. 2005. No. 5. Pp. 23-28.

12. Babkov V.V., Salov A.S., Plaks A.A., Kolesnik G.S., Sakhibgareev R.R. Questions of the efficiency of the use of high-strength concretes in reinforced concrete structures // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2009. No. 10. Pp. 43.

13. Veselov V.A. Design of bases and foundations. Fundamentals of theory and examples of calculation. Publishing house: Moscow, Stroyizdat, 1990. 304 p.

14. Mukhametzyanov Z.R., Razyapov R.V. Classification of combinations of technologically interrelated construction processes used when constructing an object // Industrial and civil construction. 2017. No. 10. Pp. 72–77.

15. Bedov A., Salov A., Gabitov A. Cad methods of structural solutions for reinforced concrete frame // XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering "Construction - The Formation of Living Environment" (FORM 2018), Moscow, Russian Federation. 2018. Vol. 365. Pp. 1-8.

16. Krot A., Ryazanova V., Gabitov A., Salov A., Rolnik L. Resource-saving technologies for advanced concrete in the Republic of Bashkortostan // MATEC Web of Conferences 7. "7th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Transbud 2018) 2018. Vol. 230. Article number 03009.

17. Mukhametzyanov Z.R., Razyapov R.V. Mechanism of development of organizational solutions based on a technological interaction between construction works and processes // Scientific journal of construction and architecture. 2018. No. 1 (49). Pp. 65–71.
18. Lastovka A.V., Danchenko T.V., Klindukh N.Yu., Berseneva M.L. Methods for calculating a strip foundation on an elastic soil foundation // Bulletin of the Eurasian Science. 2019. No. 3. URL: <https://esj.today/PDF/58SAVN319.pdf>
19. Sinitsin D.A., Babkov V.V., Sakhigareev R.R., Sakhigareev R.R., Rezvova V.P. The use of self-compacting concrete mixes in construction practice of the Republic of Bashkortostan // Stroitelnye materialy. 2019. No. 12. Pp. 45-51.
20. Mukhametzyanov Z.R. Modeling of construction technology of objects on the basis of technological interaction of works // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 451. No. 012077. doi:10.1088/1757-899X/451/1/012077.
21. Noskov I.V., Reshetov M.M., Lyutov V.N., Ananiev S.A., Noskov K.I. Reasons for reducing and determining the strength of concrete foundations by methods of destructive and non-destructive control during the construction and operation of buildings and structures // Bulletin of the Eurasian Science. 2020. No. 6. URL: <https://esj.today/PDF/04SAVN620.pdf>

**Информация об авторах:**

**Бедов Анатолий Иванович**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, кандидат технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.

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

**Рязанова Виктория Альбертовна**

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций.

E-mail: [vryazanova@hotmail.com](mailto:vryazanova@hotmail.com)

**Габитов Азат Исмагилович**

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия, доктор технических наук, профессор кафедры строительных конструкций.

E-mail: [azat7@ufanet.ru](mailto:azat7@ufanet.ru)

**Салов Александр Сергеевич**

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и технологии строительного производства.

E-mail: [salov@list.ru](mailto:salov@list.ru)

**Исламгалиева Диана Руслановна**

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия, магистрант по направлению Строительство.

E-mail: [diana.islamgalieva@yandex.ru](mailto:diana.islamgalieva@yandex.ru)

**Information about authors:**

**Bedov Anatoly Iv.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, PhD of Engineering, Professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone.

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

**Ryazanova Victoria Al.**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, PhD of Engineering, Assistant Professor of Building Constructions Department.

E-mail: [vryazanova@hotmail.com](mailto:vryazanova@hotmail.com)

**Gabitov Azat Is.**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, doctor of engineering, professor of Building Constructions Department.

E-mail: [azat7@ufanet.ru](mailto:azat7@ufanet.ru)

**Salov Alexander S.**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, PhD of engineering, assistant professor of Highways and Structural Engineering Department,

E-mail: [salov@list.ru](mailto:salov@list.ru)

**Islamgalieva Diana R.**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia, master's Degree student in Construction.

E-mail: [diana.islamgalieva@yandex.ru](mailto:diana.islamgalieva@yandex.ru)

И.В. БЕССОНОВ<sup>1</sup>, Б.И. БУЛГАКОВ<sup>2</sup>, А.В. ЛАНКИН<sup>3</sup>, И.С. ГОВРЯКОВ<sup>1,2</sup>,  
Э.А. ГОРБУНОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>«Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Бутовский комбинат строительных материалов, г. Москва, Россия

## ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ ЛИЦЕВОГО КИРПИЧА

**Аннотация.** Рассмотрены основные причины разрушения лицевого кирпича. Указано, что свойства керамических изделий при их эксплуатации в стеновой кладке во многом зависят от качества подготовками глиняной массы. Сезонное промораживание глины позволяет улучшить её формовочные и сушильные свойства. Расчетами подтверждено, что высота конуса при сезонном хранении глины для климатических условий Московского региона должна быть не более 6 метров. Представлен критический анализ теории химической деструкции керамического кирпича при взаимодействии щелочей с оксидами кремния и алюминия аморфной фазы. Ионы кальция и магния в гораздо меньшей степени влияют на коррозионные процессы кирпича в результате образования легкорастворимых силикатов и алюминатов по сравнению с ионами натрия и калия. Предложена дифференциация требований по морозостойкости лицевого кирпича в зависимости от климатических условий региона строительства.

**Ключевые слова:** лицевой кирпич, глина, расслоение, химическая коррозия, морозостойкость, гидросиликаты кальция, гидроалюминаты кальция.

I. V. BESSONOV<sup>1</sup>, B. I. BULGAKOV<sup>2</sup>, A. V. LANKIN<sup>3</sup>, I. S. GOVRYAKOV<sup>1,2</sup>,  
E. A. GORBUNOVA<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

<sup>3</sup>Butovo plant of building materials, Moscow, Russia

## THE REASONS FOR THE DESTRUCTION OF THE FACE BRICK

**Abstract.** The main causes of the destruction of the front brick are considered. It is indicated that the properties of ceramic products during their operation in masonry largely depend on the quality of the preparation of the clay mass. Seasonal freezing of clay improves its molding and drying properties. The height of the cone during seasonal storage of clay for the climatic conditions of the Moscow region should be no more than 6 meters. It is confirmed by calculation. A critical analysis of the theory of chemical destruction of ceramic bricks during the interaction of alkalis with oxides of silicon and aluminum of the amorphous phase is presented. Calcium and magnesium ions have a much lesser effect on the corrosion processes of bricks because of the formation of easily soluble silicates and aluminates compared to sodium and potassium ions. It is proposed to separate the requirements for frost resistance of facing bricks is proposed depending on the climatic conditions of the construction.

**Keywords:** front brick, clay, delamination, chemical corrosion, frost resistance, calcium hydrosilicates, calcium hydroaluminates.

© Бессонов И.В., Булгаков Б.И., Ланкин А.В., Говряков И.С., Горбунова Э.А., 2023

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ищук М.К. Отечественный опыт возведения зданий с наружными стенами из облегченной кладки. – М.: РИФ Стройматериалы», 2009. 360 с.

2. Рахимов Р.З. Керамический и силикатный кирпич в строительстве // Строительные материалы. 2009. №6. С. 24-27.
3. Бабаев З.К., Матчам Ш.К., Эрметов А.И. Керамический кирпич на основе низкосортных глин модифицированный стеклом // Научные горизонты. 2018. №1(5). С. 203-208.
4. Francisco M. Fernandes 1-Clay bricks In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Long-term Performance and Durability of Masonry Structures, Woodhead Publishing, 2019. Pp. 3-19.
5. Dehghan S.M., Najafgholipour M.A., Baneshi V., Rowshanzamir M. Mechanical and bond properties of solid clay brick masonry with different sand grading. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 174. Pp. 1-10.
6. Stryszewska T., Kańka S. Characterization of factors determining the durability of brick masonry. *Brick and block masonry – from historical to sustainable masonry*. 2020. No 1. 6 p.
7. Шигвалеева Е.А. Кирпич как строительный материал, виды и особенности // Новая наука: опыт, традиции, инновации. 2017. №3. С. 113-116.
8. Шаманов В.А. Причины отслоения наружного слоя лицевого кирпича // ИВД. 2018. №1 (48).
9. Barnat-Hunek D., Smarzewski P., Suchorabc Z. Effect of hydrophobisation on durability related properties of ceramic brick. *Construction and Building Materials*. 2016. No 111. Pp. 275-285.
10. Stryszewska T. The change in selected properties of ceramic materials obtained from ceramic brick treated by the sulphate and chloride ions. *Construction and Building Materials*. 2014. No 66. Pp. 268-274.
11. Кropyvnytska T., Semeniv R., Kotiv R., Novytskyi Yu. Effects of Nano-liquids on the Durability of Brick Constructions for External Walls. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 100. Pp. 237-244.
12. Ahmed Abdulhadi, Mohamed Mussa, Yasir Kadhim The clay rocks properties for the production of the ceramic bricks. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. Vol. 111. No3.
13. Белавенец М.И. Глиноведение. Кирпичное производство. Петербургский способ формования сырца для строительного кирпича. 1905. 47 с.
14. Zheldakov D.Yu. The Brick Material Durability in Brickwork. Alfa Build, 2020. Vol. 15. Article No. 1504. ISSN 2658-5553.
15. Желдаков Д.Ю., Турсуков С.А. Особенности методики выполнения инженерных изысканий на объектах незавершенного строительства с прогнозом долговечности БСТ: Бюллетень строительной техники, 2022, № 6 (1054). С. 47–49.
16. Dmitry Zheldakov, Radik Mustafin, Vladimir Kozlov, Askar Gaysin, Dmitriy Sinitsin, Bulat Bulatov. Durability Control of Brickwork's Material Including Operation Parameters of the Building Enclosure Mathematical Modelling of Engineering Problems. Vol. 8. No. 6. December, 2021. Pp. 871-880. Journal homepage: <http://iicta.org/journals/mmer>
17. Ферронская А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона. М.: АСВ, 2006. 336 с.
18. Котляр В. Д., Небежко Н.И., Терехина Ю.В., Котляр А.В. К вопросу о химической коррозии и долговечности кирпичной кладки // Строительные материалы. 2019. №10. С. 78-84.
19. Желдаков Д.Ю. Химическая коррозия кирпичной кладки. Постановка задачи // Строительные материалы. 2018. №6. С. 29-32.
20. Кукарина Е.В. Клинкер-усовершенствованный кирпич // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 1-1 (69). С. 181-184.
21. Крыгина А.М., Мальцев П.В., Картамышев Н.В., Ильинов А.Г. О долговечности каменной кладки // Вестник МГСУ. 2011. №3. С. 185-188.
22. Ананьев А.А. Повышение долговечности лицевого керамического кирпича и камня в наружных стенах зданий. Автореферат на соискание уч. степ. к.т.н. Москва, 2007. ОАО ВНИИСТРОМ им. П.П. Будникова.

## REFERENCES

1. Ishchuk M.K. Otechestvennyj opyt vozvedeniya zdaniy s naruzhnymi stenami iz olegchennoj kladki [Domestic experience in the construction of buildings with external walls made of lightweight masonry]. Moscow: RIF Building Materials, 2009. 360 p. (rus)
2. Rakhimov R.Z. Keramicheskii i silikatnyi kirpich v stroitel'stve [Ceramic and silicate bricks in construction] *Stroitel'nye materialy*. 2009. No.6. Pp. 24-27. (rus)
3. Babaev Z. K., Matcham SH.K., Ehrmetov A.I. Keramicheskii kirpich na osnove nizkosortnykh glin modifitsirovannykh steklom [Ceramic bricks based on low-grade clays modified with glass] *Nauchnye gorizonty*. 2018. No.1(5). Pp. 203-208. (rus)
4. Francisco M. Fernandes 1-Clay bricks In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Long-term Performance and Durability of Masonry Structures, Woodhead Publishing, 2019. Pp. 3-19.
5. Dehghan S.M., Najafgholipour M.A., Baneshi V., Rowshanzamir M. Mechanical and bond properties of solid clay brick masonry with different sand grading. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 174. Pp. 1-10.
6. Stryszewska T., Kańka S.Characterization of factors determining the durability of brick masonry. Brick and block masonry – from historical to sustainable masonry. 2020. No 1. 6 p.

7. Shigvaleeva E.A. Kirpich kak stroitel'nyi material, vidy i osobennosti [Brick as a building material, types and features] *Novaya nauka: opyt, traditsii, innovatsii*. 2017. No. 3. Pp. 113-116. (rus)
8. Shamanov V.A. Prichiny otsloeniya naruzhnogo sloya litseвого kirpicha [Causes of peeling of the outer layer of the facing brick] *IVD*. 2018. №1. (rus)
9. Barnat-Huneka D., Smarzewski P., Suchorabc Z. Effect of hydrophobisation on durability related properties of ceramic brick. *Construction and Building Materials*. 2016. No. 111. Pp. 275-285.
10. Stryzewska T. The change in selected properties of ceramic materials obtained from ceramic brick treated by the sulphate and chloride ions. *Construction and Building Materials*. 2014. No. 66. Pp. 268-274.
11. Kropyvnytska T., Semeniv R., Kotiv R., Novytskyi Yu. Effects of Nano-liquids on the Durability of Brick Constructions for External Walls. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 100. Pp. 237-244.
12. Ahmed Abdulhadi, Mohamed Mussa, Yasir Kadhim The clay rocks properties for the production of the ceramic bricks. *Magazine of Civil Engineering*. 2022. Vol. 111. No. 3.
13. Belavenec M.I. Glinovedenie. Kirpichnoe proizvodstvo. Peterburgskij sposob formovaniya syrca dlya stroitel'nogo kirpicha [Clay science. Brick production. Petersburg method of molding raw materials for building bricks]. Petersburg: Ed. book. skl. "Clay science", 1905. 47 p. (rus)
14. Zheldakov, D.Yu. The Brick Material Durability in Brickwork. *Alfa Build*, 2020. Vol. 15. Article No. 1504. ISSN 2658-5553.
15. Zheldakov D.Yu., Tursukov S.A. Osobennosti metodiki vypolneniya inzhenernyh izyskanij na ob'ektah nezavershenного stroitel'stva s prognozom dolgovechnosti [Features of the methodology for performing engineering surveys at objects of construction in progress with a forecast of durability]. *BMB: Building Machinery Bulletin*. 2022. No. 6 (1054). Pp. 47–49. (rus)
16. Dmitry Zheldakov, Radik Mustafin, Vladimir Kozlov, Askar Gaysin, Dmitriy Sinitsin, Bulat Bulatov. Durability Control of Brickwork's Material Including Operation Parameters of the Building Enclosure Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2021. Vol. 8. No. 6. Pp. 871-880.
17. Ferronskaya A.V. Dolgovechnost' konstrukcij iz betona i zhelezobetona [Durability of structures made of concrete and reinforced concrete]. Moscow.: ASV, 2006. 336 p. (rus)
18. Kotlyar V.D., Nebezsko N.I., Terekhina YU.V., Kotlyar A.V. K voprosu o khimicheskoi korrozii i dolgovechnosti kirpichnoi kladki [On the issue of chemical corrosion and durability of brickwork] *Stroitel'nye materialy*. 2019. No. 10. Pp. 78-84. (rus)
19. Zheldakov D.Yu. Khimicheskaya korroziya kirpichnoi kladki. Postanovka zadachi [Chemical corrosion of brickwork. Formulation of the problem] *Stroitel'nye materialy*. 2018. No. 6. Pp. 29-32. (rus)
20. Kukarina E.V. Klinker-usovershenstvovannyi kirpich [Clinker-improved brick] *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2021. No. 1-1 (69). Pp. 181-184. (rus)
21. Krygina A.M., Mal'tsev P.V., Kartamyshev N.V., Il'inov A.G. O dolgovechnosti kamЕННОй kladki [On the durability of masonry] *Vestnik MGSU*. 2011. No. 3. Pp. 185-188. (rus)
22. Anan'ev A.A. Povyshenie dolgovechnosti liceвого keramicheskogo kirpicha i kamnya v naruzhny`x stenax zdaniy [Increasing the durability of the front ceramic brick and stone in the exterior walls of buildings] *Candidate's thesis*. OAO VNIISTROM im. P.P. Budnikova. Moscow, 2007.

#### Информация об авторах:

##### **Бессонов Игорь Вячеславович**

«Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия,  
главный научный сотрудник, кандидат технических наук.  
E-mail: [bessonoviv@mail.ru](mailto:bessonoviv@mail.ru)

##### **Булгаков Борис Игоревич**

«Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
доцент, кандидат технических наук.  
E-mail: [bulgakovbi@mgsu.ru](mailto:bulgakovbi@mgsu.ru)

##### **Ланкин Александр Викторович**

Бутовский комбинат строительных материалов, г. Москва, Россия,  
инженер-строитель-технолог.  
E-mail: [lankin4@yandex.ru](mailto:lankin4@yandex.ru)

**Говряков Илья Сергеевич**

«Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия, инженер.

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

E-mail: [govr190@mail.ru](mailto:govr190@mail.ru)

**Горбунова Элина Александровна**

«Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия, инженер.

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

E-mail: [eg15082000@mail.ru](mailto:eg15082000@mail.ru)

**Information about authors:**

**Bessonov Igor V.**

Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Moscow, Russia,

chief scientific officer, candidate in technical sciences.

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

**Bulgakov Boris Ig**

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia, candidate in technical sciences, docent.

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

**Lankin Aleksandr V.**

Butovo plant of building materials, Moscow, Russia, engineer-technologist.

E-mail: [lankin4@yandex.ru](mailto:lankin4@yandex.ru)

**Govryakov Ilya S.**

Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Moscow, Russia, engineer.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia, student.

E-mail: [govr190@mail.ru](mailto:govr190@mail.ru)

**Gorbunova Elina Al.**

Research Institute of Building Physics Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIISF RAASN), Moscow, Russia, engineer.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia, student.

E-mail: [eg15082000@mail.ru](mailto:eg15082000@mail.ru)



А.А. ИГНАТЬЕВ<sup>1,2</sup>, П.Б. РАЗГОВОРОВ<sup>1</sup>, В.М. ГОТОВЦЕВ<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия<sup>2</sup>ФАУ «РОСДОРНИИ», г. Москва, Россия

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИЕ СВОЙСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С ВКЛЮЧЕНИЕМ ФОСФОГИПСА И ВТОРИЧНОГО ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

**Аннотация.** Рассмотрены эффекты структурообразования в дисперсных системах, получаемых путем гранулирования окатыванием при изготовлении асфальтобетонных смесей с включением до 30% фосфогипса. При изучении физико-химических и потребительских свойств битума с добавкой полиэтилентерефталата использован метод измерения краевого угла смачивания. Микрофотографии модифицированного вяжущего позволяют судить об изменении состояния поверхности битума. Зарегистрированы тепловые эффекты как результат модифицирования свойств таких материалов. Установлено, что получение асфальтобетонной смеси методом гранулирования окатыванием обеспечивает высокие показатели прочности на сжатие отвержденного материала. Выявлен рост водоустойчивости асфальтобетона при одновременном введении в дисперсную систему полиэтилентерефталата и порошка промышленного отхода – фосфогипса. Обнаружено синергетическое влияние указанных добавок на достижение положительного эффекта структурообразования в асфальтовяжущих материалах, что выявляет новые перспективы их использования в производстве строительных работ.

**Ключевые слова:** композиционные материалы, асфальтобетонные смеси, модификация вяжущего, фосфогипс, полиэтилентерефталат, гранулирование окатыванием.

А.А. IGNATYEV<sup>1,2</sup>, P.B. RAZGOVOROV<sup>1</sup>, V.M. GOTOVTSSEV<sup>1</sup>,<sup>1</sup>Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia<sup>2</sup>FAI "ROSDORNII", Moscow, Russia

## STRUCTURE FORMATION AND CONSUMER PROPERTIES OF GRANULAR ASPHALT-CONCRETE MIXTURES WITH PHOSPHOGYPSUM INCLUSION AND SECONDARY POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

**Abstract.** The effects of structure formation in disperse systems obtained by pelletizing in the manufacture of asphalt concrete mixtures with the inclusion of up to 30% phosphogypsum have been considered. In studying the physical-chemical and consumer properties of bitumen with polyethylene terephthalate additive they used the method of measuring the wetting edge angle. Microphotographs of modified binder make it possible to judge about the change of bitumen surface state. Thermal effects occurring as a result of modifying properties of such materials were registered. It was found that production of asphalt-concrete mixture by pelletizing provides high indicators of compressive strength of the hardened material. We found an increase in asphalt concrete water resistance at simultaneous introduction of polyethylene terephthalate and industrial waste phosphogypsum powder into the disperse system. Synergetic effect of the above additives on the achievement of positive effect of structure formation in asphalt-binding materials has been revealed, which reveals new prospects for their use in the production of construction works.

**Keywords:** composite materials, asphalt-concrete mixtures, binder modification, phosphogypsum, polyethylene terephthalate, pelletizing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прокофьев В.Ю., Разговоров П.Б., Ильин А.А. Основы физико-химической механики экструдированных катализаторов и сорбентов. М.: КРАСАНД. 2012. 314 с.
2. Тадмор З. и Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия. 1984. 632 с.
3. Ignat'yev A.A., Gotovtsev V.M., Gersimov D.V., Razgovorov P.B. The Modeling of Interfacial Contacts in Composites Using the Sitting Drop - Solid Body System as an Example. *New Polymer Composite Materials II Selected peer-reviewed full text papers from XVI International Scientific and Practical Conference "New Polymer Composite Materials"*. Key Engineering Materials Submitted: 2020-04-12 ISSN: 1662-9795. Vol. 869. Pp. 400-407. Accepted: 2020-05-07 doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.869.400 Online: 2020-10-27 © 2020 Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.
4. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Ч. Физико-химическая механика. М.: Наука. 1979. 469 с.
5. Румянцев А.Н., Наненков А.А., Ломов А.А., Готовцев В.М., Сухов В.Д. Структурированный асфальтобетон – новое дорожное покрытие // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. ун-т. 2013. С. 23-25.
6. Патент РФ № 2182136. Способ получения асфальтобетонной смеси. 10.05.2002 г.
7. Патент РФ № 2701007. Способ получения гранулированного асфальтовяжущего на основе фосфогипса. 24.09.2019 г.
8. Al-Mulla J., Makky S. Preparation of sustainable asphalt pavements using polyethylene terephthalate waste as a modifier // *Zast. Mater.* 2017. Vol. 58. No. 3. Pp. 394-399.
9. Khan I. M., Kabir S., Alhussain M.A., Almansoor F.F. Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction // *Procedia Eng.* 2016. Vol. 145. Pp. 1557-1564.
10. Hassani A., Ganjidoust H., Maghanaki A.A. Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement // *Waste Manag. Res.* 2005. Vol. 23. No. 4. Pp. 322-327.
11. Modarres A., Hamed H. Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET) // *Constr. Build. Mater.* 2014. Vol. 68. Pp. 259-267.
12. Leng Z., Padhan R. K., Sreeram A. Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt // *J. Clean. Prod.* 2018. Vol. 180. Pp. 682–688.
13. Худякова Т.С., Масюк А.Ф., Калинин В.Н. Особенности структуры и свойств битумов, модифицированных полимерами // *Дорожная техника и технологии*. 2003. № 4. С. 174-181.
14. Герасимов Д.В., Игнатьев А.А., Готовцев В.М., Голиков И.В. Перспективы использования фосфогипса в производстве асфальтобетона // *Дороги и мосты*. 2018. № 40. С. 304-315.
15. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Научный мир, 2007. 576 с.
16. Кочнев А.М. Физикохимия полимеров. Казань: Изд. "ФЭН". 2003. 512 с.
17. Gotovtsev V.M., Ignat'yev A.A. The effect of structuring composite building materials. *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.* V. 666 (1). (2019). doi:10.1088/1757-899X/666/1/012079 Retrieved from [www.scopus.com](http://www.scopus.com). 2019.
18. Разговоров П.Б., Игнатьев А.А., Абрамов М.А., Нагорнов Р.С. Переработка алюмосиликатного сырья и отвалов строительства метрополитена в композиционные сорбенты для очистки водных и маслосодержащих сред // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 10-26. [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020).
19. Котенко Н.П., Щерба Ю.С., Евфорицкий А.С.. Влияние полимерных и функциональных добавок на свойства битума и асфальтобетона // *Пластические массы*. 2019. № 11-12. С.47-49.
20. Беляев К.В., Чулкова И.Л. Модификация битума техническим углеродом. *Вестник СибАДИ / Строительство и архитектура*. 2019. Т. 16. № 4. С. 472-484.

REFERENCES

1. Prokofiev V.Yu., Razgovorov P.B., Iliyn A.A. *Osnovy fiziko-khimicheskoi mekhaniki ekstrudirovannykh katalizatorov i sorbentov*. [Basics of physical and chemical mechanics of extruded catalysts and sorbents.] Moscow: KRASAND. (2012). 314 p. (in Russian).
2. Tadmor Z, Gogos C.G. *Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov*. [Principles of Polymer Processing.] Moscow: Khimiya. (1984). 632 p. (in Russian).
3. Ignat'yev A.A., Gotovtsev V.M., Gersimov D.V. and Razgovorov P.B. The Modeling of Interfacial Contacts in Composites Using the Sitting Drop - Solid Body System as an Example. *New Polymer Composite Materials II Selected peer-reviewed full text papers from XVI International Scientific and Practical Conference "New Polymer Composite Materials"*. Key Engineering Materials Submitted: 2020-04-12 ISSN: 1662-9795. Vol. 869. Pp. 400-407/ Accepted: 2020-05-07 doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.869.400 Online: 2020-10-27 © (2020) Trans Tech Publications Ltd, Switzerland.

4. Rebinder P.A. Izbrannye trudy. Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika. [Selected Works. Surface Phenomena in Disperse Systems. Physical and Chemical Mechanics.] Moscow: Nauka. 1979. 469 p. (in Russian).
5. Rumyantsev A.N., Nanenkov A.A., Lomov A.A., Gotovtsev V.M., Sukhov V.D. Strukturirovanny asfal'tobeton — novoe dorozhnoe pokrytie [Structured Asphalt Concrete — the New Road Surface]. // Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika. [Recent research trends of the XXI century: Theory and Practice]. Voronezh: Voronezh State University of Forestry and Technologies. 2013. Pp. 23-25. (in Russian).
6. Patent RU2182136C2. Method of asphalt concrete mixture producing. 10.05.2002.
7. Patent RU2701007C1. Method of producing granulated asphalt-binding based on phosphogypsum 24.09.2019.
8. Al-Mulla J., Makky S. Preparation of sustainable asphalt pavements using polyethylene terephthalate waste as a modifier // Zast. Mater. 2017. Vol. 58. No. 3. Pp. 394-399.
9. Khan I. M., Kabir S., Alhussain M.A., Almansoor F.F. Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction // Procedia Eng. 2016. Vol. 145. Pp. 1557-1564.
10. Hassani A., Ganjidoust H., Maghanaki A.A. Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement // Waste Manag. Res. 2005. Vol. 23. No. 4. Pp. 322-327.
11. Modarres A., Hamed H. Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET) // Constr. Build. Mater. 2014. Vol. 68. Pp. 259-267.
12. Leng Z., Padhan R. K., Sreeram A. Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt // J. Clean. Prod. 2018. Vol. 180. Pp. 682–688.
13. Khudyakova T.S., Masyuk A.F., Kalinin V.N. Osobennosti struktury i svoystv bitumov, modifitsirovannykh polimerami [Features of the structure and properties of bitumens modified by polymers]. Road Engineering and Technology. 2003. No. 4. Pp. 174-181. (in Russian).
14. Gerasimov D.V., Ignat'yev A.A., Gotovtsev V.M., Golikov I.V. Perspektivy ispol'zovaniya fosfogipsa v proizvodstve asfal'tobetona [Prospects for using phosphogypsum in asphalt concrete production]. Dorogi i mosty [Roads and Bridges]. 2018. No. 40. Pp. 304-315.
15. Tager A.A. Fiziko-khimiya polimerov [Physics and chemistry of polymers]. Moscow: Nauchny mir, 2007. 576 p. (in Russian).
16. Kochnev A.M. Fizikokhimiya polimerov [Physics and chemistry of polymers]. Kazan: "FEN" Publ. House. 2003. 512 p. (in Russian)
17. Gotovtsev V.M., Ignat'yev A.A. The effect of structuring composite building materials. IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng. V. 666 (1). (2019). doi:10.1088/1757-899X/666/1/012079 Retrieved from www.scopus.com. 2019.
18. Razgovorov P.B., Ignatyev A.A., Abramov M.A., Nagornov R.S. Processing of raw aluminosilicates and subway construction dumps into composite sorbents for purification of water and oil-containing media. Smart Composite in Construction, 2020. Vol. 1. No. 1. Pp. 10-26. [http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1\\_2020](http://comincon.ru/index.php/tor/V1N1_2020) (in Russian).
19. Kotenko N.P., Shcherba Y.S., Evforitsky A.S. Vliyanie polimernykh i funktsional'nykh dobavok na svoystva bituma i asfal'tobetona [Influence of polymeric and functional additives on the properties of bitumen and asphalt concrete]. Plastic masses, 2019. No. 11-12. Pp. 47-49. (in Russian).
20. Belyaev K.V., Chulkova I.L. Modifikatsiya bituma tekhnicheskimi uglerodami [Modification of bitumen with technical carbon]. Vestnik SibADI // Construction and Architecture. 2019. Vol. 16. No. 4. Pp. 472-484. (in Russian).

### Информация об авторах:

#### **Игнатъев Алексей Александрович**

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидротехнического и дорожного строительства. Управление развития отраслевого образования, ФАУ «РОСДОРНИИ», г. Москва, Россия, начальник управления развития отраслевого образования.  
E-mail: [ignatyevaa@ystu.ru](mailto:ignatyevaa@ystu.ru)

#### **Разговоров Павел Борисович**

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия, зам. ректора по научной работе ЯГТУ, начальник Управления организации научно-исследовательской и интеллектуальной деятельности, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий строительного производства.  
E-mail: [razgovorovpb@ystu.ru](mailto:razgovorovpb@ystu.ru)

**Готовцев Валерий Михайлович**

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия,  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления предприятием.  
E-mail: [gotovtsev\\_vm@ystu.ru](mailto:gotovtsev_vm@ystu.ru)

**Information about authors:****Ignatyev Alexey AI.**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,  
candidate of technical sciences, associate professor, associate professor department of Hydrotechnical and Road  
Construction.

Department of Industry Education Development, FAI «ROSDORNII», Moscow, Russian,  
head of the department of Industry Education Development.

E-mail: [ignatyevaa@ystu.ru](mailto:ignatyevaa@ystu.ru)

**Razgovorov Pavel B.**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,  
head of the department of Organization of Research and Intellectual Activity, doctor of technical sciences, professor  
department of Construction Production Technologies.

E-mail: [razgovorovpb@ystu.ru](mailto:razgovorovpb@ystu.ru)

**Gotovtsev Valery M.**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,  
doctor of technical sciences, professor Enterprise Management Department.

E-mail: [gotovtsev\\_vm@ystu.ru](mailto:gotovtsev_vm@ystu.ru)

**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 сверху – 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.

**С полной версией требований к оформлению научных статей**  
**Вы можете ознакомиться на сайте <https://construction.elpub.ru/jour/index>**

*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 О.В. Юрова  
Компьютерная верстка О.В. Юрова

Подписано в печать 27.02.2023 г.  
Дата выхода в свет 10.03.2023 г.  
Формат 70×108/16. Печ. л. 8,4  
Цена свободная. Тираж 500 экз.  
Заказ № 75

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