

# СТРОИТЕЛЬСТВО И РЕКОНСТРУКЦИЯ

ISSN 2073-7416

BUILDING AND RECONSTRUCTION

№2 (106) 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

Строительные материалы  
и технологии

Building  
materials



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
SCIENTIFIC-TECHNICAL JOURNAL

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

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

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

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

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)*

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

**Реболж 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

### АКАДЕМИКУ РААСН, СЕРГЕЮ ВИКТОРОВИЧУ ФЕДОСОВУ – 70 ЛЕТ!

#### Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Быков А.А., Шардаков И.Н., Шестаков А.П., Глот И.О.** Комплексная оценка деформационного процесса в усиленных углепластиком железобетонных балках..... 4
- Калашников С.Ю., Гурова Е.В., Бандурин Н.Г.** Продольное сжатие стержня с начальной погибью, приобретающего наведенную анизотропию..... 25
- Колчунов В.И.** Модель пластичности железобетонных конструкций..... 39
- Кривошапко С.Н.** Поверхности диагонального переноса велароидального типа на ромбическом плане..... 59
- Мамин А.Н., Бамматов А.А., Гордеев Н.С.** Численное моделирование конструкций с петлевыми стыками арматуры..... 70

#### Безопасность зданий и сооружений

- Тамразян А.Г.** К безопасному значению длительного нагружения сжатых железобетонных элементов..... 80
- Федорова Н.В., Колчунов В.И., Бушова О.Б.** Расчет параметров деформирования железобетонных рам при разрушении ригелей по наклонному сечению ..... 90

#### Строительные материалы и технологии

- Бузиков Ш.В., Мотовилова М.В.** Повышение эксплуатационных показателей дорожных покрытий с асфальтовым гранулятом..... 101
- Казанская Л.Ф., Смирнова О.М.** Деструкция бетона на основе сульфатно-шлаковых вяжущих в агрессивных средах животноводческих комплексов..... 112
- Соколова С.В., Баранова М.Н., Васильева Д.И., Холопов Ю.А.** Перспективы применения промышленных отходов для повышения долговечности и огнестойкости жаростойких бетонов..... 123

# BUILDING AND RECONSTRUCTION

Scientific and technical journal  
The journal is published since 2003.  
The journal is published 6 times a year.  
**№2 (106) 2023**

The founder – Federal State Budgetary Educational Institution  
of Higher Education  
«Orel State University named after I.S. Turgenev»  
(Orel State University)

## Contents

### ACADEMICIAN OF THE RAASN, SERGEY VIKTOROVICH FEDOSOV IS 70 YEARS OLD!

#### Theory of engineering structures. Building units

<b>Bykov A.A., Shardakov I.N., Shestakov A.P., Glot I.O.</b> Comprehensive assessment of the deformation process of rc beams strengthened with cfrp sheet.....	4
<b>Kalashnikov S.Y., Gurova E.V., Bandurin N.G.</b> Longitudinal compression of a rod with an initial loss acquiring induced anisotropy.....	25
<b>Kolchunov V.I.</b> Plasticity model of reinforced concrete structures.....	39
<b>Krivoshapko S.N.</b> Surfaces of diagonal translation of velaroidal type on a rhombic plane.....	59
<b>Mamin A.N., Bammatov A.A., Gordeev N.S.</b> Numerical simulation of structures with loop joints of rebar.....	70

#### Building and structure safety

<b>Tamrazyan A.G.</b> To the safe value of long-term loading of compressed reinforced concrete elements.....	80
<b>Fedorova N.V., Kolchunov V.I., Bushova O.B.</b> Calculation of parameters of deformation of reinforced concrete frames during the destruction of crossbars along an inclined section .....	90

#### Construction materials and technologies

<b>Buzikov Sh.V., Motovilova M.V.</b> Improving the performance of road surfaces with asphalt granulate.....	101
<b>Kazanskaya L.F., Smirnova O.M.</b> Destruction of concrete based on sulfate-slag binders in aggressive environments of livestock complexes.....	112
<b>Sokolova S.V., Baranova M.N., Vasilieva D.I., Kholopov Y.A.</b> Possibilities of using industrial waste to improve heat resistant concrete durability and refractoriness.....	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:

ПИ №ФC 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

The journal Building and Reconstruction (Stroitel'stvo i rekonstruktsiya) have being included by Higher Attestation Commission in the List of peer-reviewed scientific journals, in which the main scientific results of dissertations for the degree of candidate and doctor of science should be published, for the group of scientific specialties 2.1. - Construction and architecture: 2.1.1. – Building constructions, buildings and structures (technical sciences); 2.1.2. – Soils and foundations, underground structures (technical sciences); 2.1.5. – Building products and construction materials (technical sciences); 2.1.7. – Construction technology and organization (technical sciences); 2.1.9. – Structural mechanics (technical sciences); 2.1.10. – Environmental safety in construction and urban economy (technical sciences); 2.1.11. – Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture); 2.1.12. – Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture); 2.1.13. – Urban planning, planning of rural settlements (architecture). The journal is indexed in RSCI, RSCI on the Web of Science.

## АКАДЕМИКУ РААСН, СЕРГЕЮ ВИКТОРОВИЧУ ФЕДОСОВУ – 70 ЛЕТ!

### Уважаемый Сергей Викторович!

Редакция журнала «Строительство и реконструкция», редколлегия, профессорско-преподавательский состав, члены диссертационного совета и аспиранты строительных факультетов Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева, Юго-Западного государственного университета сердечно поздравляют Вас со знаменательным Юбилеем!

Ваша научно-творческая и организационная деятельность в области повышения долговечности строительных конструкций принесла Вам заслуженное признание и известность в нашей стране и за рубежом.

Вы признанный специалист в области теплообменных процессов в технологиях производства строительных материалов и изделий, нанотехнологий в структурообразовании композит-бетонов с использованием импульсных, механических и механохимических методов активации. Ваши достижения отмечены заслуженными государственными и ведомственными наградами. Талант ученого, принципиальность и высокий профессионализм позволили Вам добиться значимых успехов в научной деятельности. Вы автор более 700 опубликованных научных трудов, включая 20 монографий, 13 учебных пособий, 21 авторское свидетельство, 17 патентов на полезные модели и изобретения РФ. Как академик Российской академии архитектуры и строительных наук вот уже 5 лет Вы возглавляете Верхневолжское представительство Центрального территориального отделения РААСН.

Как профессор, заведующий кафедрой, проректор, ректор и президент Ивановского государственного политехнического университета Вы внесли неоценимый вклад в развитие одного из ведущих ВУЗов страны. Вы готовите лучших специалистов отрасли, аспирантов и докторантов, а также ведете активную работу по аттестации специалистов высшей квалификации, являясь членом диссертационных советов по защите докторских и кандидатских диссертаций. Только под Вашим личным руководством защищены 26 докторских и 76 кандидатских диссертаций.

Желаем Вам, дорогой Сергей Викторович, доброго здоровья благополучия и новых творческих успехов в научно-педагогической деятельности и во всех Ваших начинаниях на благо отечественной строительной науки и высшего образования.



А.А. БЫКОВ<sup>1</sup>, И.Н. ШАРДАКОВ<sup>2</sup>, А.П. ШЕСТАКОВ<sup>2</sup>, И.О. ГЛОТ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия

<sup>2</sup>«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В УСИЛЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОМ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ

**Аннотация.** В статье исследуется поведение железобетонных балок, усиленных углепластиком, в условиях статического нагружения. В эксперименте участвовали 22 крупномасштабных образца – железобетонные балки размером 120x220x1290мм. Часть образцов были усилены углепластиком до нагружения, часть в процессе нагружения после получения первых трещин в бетоне и их инъектирования. Нагружение балок производилось по схеме 4-х точечного изгиба. Деформационное состояние балок контролировалось с помощью тензометрии и прогибомера. Отслоение углепластика оценивалось методом инфракрасной термографии непосредственно в процессе нагружения.

Оценено влияние углепластика на несущую способность и жесткость балок, усиленных до приложения нагрузки и в ходе нагружения. Продемонстрирована способность углепластика сдерживать раскрытие трещин и способность метода усиления углепластиком в сочетании с инъектированием трещин восстановить жесткость конструкции. Представлена картина трещинообразования в образцах. Показано влияние качества подготовки поверхности на характер отслоения углепластика и, как следствие, характер трещинообразования и разрушения. Определены параметры и особенности отслоения углепластика в зависимости от механизма отслоения. Сопоставлены параметры и интенсивность отслоения углепластика при нагружении для балок, усиленных в ненагруженном состоянии и под нагрузкой. Выполнено сравнение экспериментальных значений деформаций отслоения, с теоретическими значениями, определенными по 8-ми известным методикам.

Показано, что фактическая деформация отслоения углепластика на 15-75% ниже значений, вычисленных по формуле СП 164.1325800.2014, а факт отслоения углепластика не определяет предельное состояние усиленной железобетонной балки при наличии надежной анкеровки продольной полосы композита на опорах.

**Ключевые слова:** железобетонная балка, углепластик, усиление железобетонной балки композитным материалом, отслоение, инфракрасная термография, инъектирование трещин.

A.A. BYKOV<sup>1</sup>, I.N. SHARDAKOV<sup>2</sup>, A.P. SHESTAKOV<sup>2</sup>, I.O. GLOT<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

<sup>2</sup>Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia

## COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE DEFORMATION PROCESS OF RC BEAMS STRENGTHENED WITH CFRP SHEET

**Abstract.** The paper investigates the behavior of reinforced concrete beams reinforced with CFRP sheet under static loading. The experiment involved 22 large-scale samples – reinforced concrete beams with a size of 120x220x1290mm. One part of the specimens was reinforced with CFRP before loading, the other – under load after the appearance of the first cracks in concrete and their injection. The beams were loaded according to the 4-point bending scheme. The deformation state of the beams was assessed using strain gauge and deflection meter. The debonding of the carbon fiber sheet was evaluated by infrared thermography directly in the process of loading.

The effect of CFRP on the bearing capacity and stiffness of beams reinforced before and during loading is evaluated. The ability of CFRP to restrain the opening of a crack was demonstrated.

*The effectiveness of the method of reinforcing beams with CFRP in combination with injection of cracks to restore the rigidity of the structure was evaluated. The pattern of crack formation in samples is presented. The influence of the quality of surface preparation on the nature of the debonding of carbon fiber and the features of cracking and destruction is shown. The parameters and features of CFRP debonding were determined for various debonding mechanisms. The parameters and intensity of CFRP debonding for beams reinforced in the unloaded state and under load are compared. The experimental values of debonding strains are compared with theoretical values determined by 8 known methods.*

*It is shown that the actual deformation of CFRP debonding is 15-75% lower than the values calculated in accordance with Russian Building Codes SP 164.1325800.2014, and the fact of CFRP debonding does not determine the limiting state of the reinforced concrete beam in the presence of reliable anchoring of the longitudinal strip of the composite on supports.*

**Keywords:** CFRP sheets, composite materials, load carrying capacity of RC beams, strengthening of RC beams, interfacial debonding, infrared thermography.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Esfahani M.R., Kianoush M.R., Tajari A.R. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets // *Engineering Structures*. 2007. No. 29 (10). Pp. 2428-2444. doi:[10.1016/j.engstruct.2006.12.008](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.12.008)
2. Ritchie P.A., Thomas D.A., Lu L.W., Conelly G.M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics. ATLSS Report No. 90-06. 1990. [Online]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://preserve.lib.lehigh.edu/islandora/object/preserve%3AAbp-4308309>. (date of application: 08.12.2022).
3. Saadatmanesh H., Ehsani M.R. RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study // *ASCE*. 1991. No. 117 (11). Pp. 3417-3455. doi:[10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:11\(3417\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3417))
4. Triantafillou T.C., Plevris N. Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials // *Materials and Structures*. 1992. No. 25 (4). Pp. 201-211. doi:[10.1007/BF02473064](https://doi.org/10.1007/BF02473064)
5. Shahawy M.A., Arockiasamy M., Beitelman T., Sowrirajan R. Reinforced concrete rectangular beams strengthened with CFRP laminates // *Composites Part B: Engineering*. 1996. No. 27. Pp. 225-233. [http://dx.doi.org/10.1016/1359-8368\(95\)00044-5](http://dx.doi.org/10.1016/1359-8368(95)00044-5)
6. Rahimi H., Hutchinson A. Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates // *Journal of Composites for Construction*. 2001. No. 5 (1). Pp. 44-56. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2001\)5:1\(44\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2001)5:1(44))
7. Быков А.А., Третьякова А.Н., Калугин А.В. Расчет деформаций отслоения композита для усиленных изгибаемых железобетонных элементов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2014. № 3. С. 112-122.
8. Быков А.А., Калугин А.В., Балакирев А.А. Чистый изгиб железобетонных балок, армированных углеродным холстом // *Промышленное и гражданское строительство*. 2011. № 7. С. 22-25.
9. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами // *Известия вузов. Строительство*. 2010. № 2. С. 112-124.
10. Григорьева Я.Е. Экспериментальное исследование влияния внешнего армирования изгибаемых железобетонных балок углеволокном на прочность и жесткость конструкций // *Вестник МГСУ*. 2011. № 8. С. 181-185.
11. Маилян Д.Р., Польской П.П. Прочность и деформативность усиленных композитными материалами балок при различных варьируемых факторах [Электронный ресурс] // *Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона»*. 2013. № 2. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/42R\\_N2y13.pdf\\_1676.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/42R_N2y13.pdf_1676.pdf) (дата обращения: 08.12.2022).
12. Шевцов Д.А. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами // *Промышленное и гражданское строительство*. 2014. № 8. С. 61-65.
13. Леонова А.Н., Чагина А.С. Сравнение особенностей U-образного анкерного крепления с другими видами креплений при усилении конструкций композитным материалом // *Научные труды КубГТУ*. 2021. № 5. С. 40-50.
14. Римшин В.И., Меркулов С.И. К вопросу усиления железобетонных конструкций внешним армированием композитным материалом // *Вестник томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 5. С. 92-100. doi: [10.31675/1607-1859-2018-20-5-92-100](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-5-92-100)
15. Yao J., Teng J.G., Chen J.F. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints // *Composites Part B: Engineering*. 2005. No. 36 (2). Pp. 99-113. doi:[10.1016/j.compositesb.2004.06.001](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.06.001)
16. Taljsten B. Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1997. No. 17 (4). Pp. 319-327.
17. Woo S.K., Kim J.H.J., Byun K.J., Song Y.C. Bond-slip parameter determination procedure of RC flexure member strengthened with prestressed CFRP plates // *KSCSE Journal of Civil Engineering*. 2013. No. 17 (1). Pp.179 - 191. doi:[10.1007/s12205-013-1592-2](https://doi.org/10.1007/s12205-013-1592-2)

18. Gravina R.J., Hadigheh S.A., Setunge S. Bond and force transfer of FRP materials bonded to concrete using sitecure system // APFIS 2012. Hokkaido Univ. Japan. 2012.
19. Pellegrino C., Tinazzi D., Modena C. Experimental Study on Bond Behavior between Concrete and FRP Reinforcement // Journal of Composites for Construction. 2008. No. 12 (2). Pp. 180-189.
20. Teng J.G., Chen J.F. Debonding failures of RC beams strengthened with externally bonded FRP reinforcement: behaviour and modeling // APFIS 2007. 2007. Pp. 33-42.
21. Бокарев С.А., Костенко А.Н., Смердов Д.Н., Неровных А.А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Науковедение». 2013. № 3. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/94tvn313.pdf> (дата обращения: 08.12.2022).
22. Польской П.П., Василенко Н.В., Меретуков З.А. О влиянии модуля упругости композитных материалов на прочность и деформативные свойства усиленных конструкций [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. 2019. № 8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vliyanii-modulya-uprugosti-kompozitnyh-materialov-na-prochnost-i-deformativnye-svoystva-usilennyh-konstruktsiy/viewer> (дата обращения: 08.12.2022).
23. Смердов Д.Н., Ящук М.О. Экспериментальные исследования несущей способности изгибаемых железобетонных элементов, усиленных преднапряженными полимерными композиционными материалами // Научный журнал строительства и архитектуры. 2019. № 3 (55). С. 72-83. doi: 10.25987/VSTU.2019.55.3.008
24. Zhang Ah., Jin Wl., Li Gb. Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates. J. Zhejiang Univ. - Sci. 2006. No. 7 (3). Pp. 436-444. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A0436>
25. Parikh K. Modhera C.D. Application of GFRP on preloaded retrofitted beam for enhancement in flexural strength // International journal of civil and structural engineering. 2012. No. 2 (4). Pp.1070-1080.
26. Римшин В.И., Меркулов С.И., Есипов С.М.. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2018. № 2 (35). С. 93-100. doi.org/10.5281/zenodo.1286034
27. Bykov A., Shardakov I., Shestakov A. Determination of thermography modes for recording delamination between composite material and reinforced concrete structures // Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena. 2015. No. 243. Pp. 97-104. doi: [10.4028/www.scientific.net/SSP.243.97](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.243.97)
28. ACI 440.2R-08. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI. 2008.
29. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Rome. 2004.
30. Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheet // Concrete Engineering Series 41. Japan Society of Civil Engineers. 2001.
31. Teng J.G., Smith S.T., Yao J., Chen J.F. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs // Construction and Building Materials. 2003. No. 17 (6-7). Pp. 447-462.
32. Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., Jiang J.J. Intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams: FE analysis and strength model // Journal of Composites for Construction. 2007. No. 11(2). Pp.161-174. doi: [10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(161))
33. Said H., Wu Z. Evaluating and proposing models of predicting IC debonding failure // Journal of Composites for Construction. 2008. No. 12 (3). Pp. 284-299. doi: [10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:3\(284\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:3(284))
34. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования.
35. Неровных А.А. Автореферат. Совершенствование методики оценки грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, усиленных композиционными материалами. Новосибирск. 2013.

## REFERENCES

1. Esfahani M.R., Kianoush M.R., Tajari A.R. Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets. Engineering Structures. 2007. Vol. 29. Issue 10. Pp. 2428-2444. doi: [10.1016/J.ENGSTRUCT.2006.12.008](https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2006.12.008)
2. Ritchie P.A., Thomas D.A., Lu L.W., Conelly G.M. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics. ATLSS Report No. 90-06. 1990. [Online]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://preserve.lib.lehigh.edu/islandora/object/preserve%3AAbp-4308309>. (date of application: 08.12.2022).
3. Saadatmanesh H., Ehsani M.R. RC beams strengthened with GFRP plates. I: Experimental study // ASCE. 1991. Vol. 117. No. 11. Pp. 3417-3455. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:11\(3417\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3417))
4. Triantafillou T.C., Plevris N. Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fibre-composite materials // Materials and Structures. 1992. Vol. 25. Issue 4. Pp. 201-211. doi: [10.1007/BF02473064](https://doi.org/10.1007/BF02473064)
5. Shahawy M.A., Arockiasamy M., Beitelman T., Sowrirajan R. Reinforced concrete rectangular beams strengthened with CFRP laminates // Composites Part B: Engineering. 1996. Vol. 27. Issues 3-4. Pp. 225-233. [https://dx.doi.org/10.1016/1359-8368\(95\)00044-5](https://dx.doi.org/10.1016/1359-8368(95)00044-5)

6. Rahimi H., Hutchinson A. Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates // *Journal of Composites for Construction*. 2001. Vol. 5. No. 1. Pp. 44-56. [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2001\)5:1\(44\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2001)5:1(44))
7. Bykov A.A., Tretyakova A.N., Kalugin A.V. Raschet deformatsii otsloeniia kompozita dlia usilennykh izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov [Delamination buckling analysis for reinforced concrete flexural elements]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2014. Vol. 3. Pp. 112-122. (rus).
8. Bykov A.A., Kalugin A.V., Balakirev A.A. Chisty izgib zhelezobetonnykh balok, armirovannykh uglerodnym kholstom [Pure bending of reinforced concrete beams reinforced with carbon-based cloth]. *Industrial and civil engineering*. 2011. Vol. 7. Pp. 22-25. (rus).
9. Bokarev S.A., Smerdov D.N. Eksperimentalnye issledovaniia izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh kompozitnymi materialami // *Izvestiia vuzov. Stroitelstvo*. 2010. Vol. 2. Pp. 112-124. (rus).
10. Grigoryeva Y.Y. Eksperimentalnoe issledovanie vliianiia vneshnego armirovaniia izgibaemykh zhelezobetonnykh balok uglevoloknom na prochnost i zhestkost konstrukttsii [Experimental research of influence of external reinforcing of bent reinforced concrete beams with FRP composites on durability and rigidity of designs]. *Vestnik MGSU*. 2011 Vol. 8. Pp. 181-185. (rus).
11. Polskoy P.P., Mailian D.R. Prochnost i deformativnost usilennykh kompozitnymi materialami balok pri razlichnykh variruemykh faktorakh. [Online]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Inzhenernyi vestnik Dona»*. 2013. Vol. 2. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/42R\\_N2y13.pdf\\_1676.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/42R_N2y13.pdf_1676.pdf) (date of application: 08.12.2022). (rus).
12. Shevtsov D.A. Usilenie zhelezobetonnykh konstrukttsii kompozitsionnymi materialami [Strengthening of reinforced concrete structures with fiber reinforced composites]. *Industrial and civil engineering*. 2014. Vol. 8. Pp. 61-65. (rus).
13. Leonova A.N., Chagina A.S. Sravnenie osobennosti U-obraznogo ankernogo krepleniia s drugimi vidami krepleniia pri usilenii konstrukttsii kompozitnym materialom [Comparison of the features of u-shaped anchorage with other types of fasteners when reinforcing structures with composite material]. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2021. Vol. 5. Pp. 40-50. (rus).
14. Rimshin V.I., Merkulov S.I. K voprosu usileniia zhelezobetonnykh konstrukttsii vneshnim armirovaniem kompozitnym materialom [External reinforcement of concrete structures using composite materials]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. JOURNAL of Construction and Architecture*. 2018. Vol. 5. Pp. 92-100. (rus). doi:[10.31675/1607-1859-2018-20-5-92-100](https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-5-92-100)
15. Yao J., Teng J.G., Chen J.F. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints // *Composites Part B: Engineering*. 2005. Vol. 36. Issue 2. Pp. 99–113. doi:[10.1016/j.compositesb.2004.06.001](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.06.001)
16. Taljsten B. Defining anchor lengths of steel and CFRP plates bonded to concrete // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 1997. Vol.17. Issue 4. Pp. 319–327.
17. Woo S.K., Kim J.H.J., Byun K.J., Song Y.C. Bond-slip parameter determination procedure of RC flexure member strengthened with prestressed CFRP plates // *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2013. Vol. 17. Issue 1. Pp.179 - 191. doi:[10.1007/s12205-013-1592-2](https://doi.org/10.1007/s12205-013-1592-2)
18. Gravina R.J., Hadigheh S.A., Setunge S. Bond and force transfer of FRP materials bonded to concrete using sitecure system // *APFIS 2012. Hokkaido Univ. Japan*. 2012.
19. Pellegrino C., Tinazzi D., Modena C. Experimental Study on Bond Behavior between Concrete and FRP Reinforcement // *Journal of Composites for Construction*. 2008. Vol. 12. No. 2. Pp. 180-189.
20. Teng J.G., Chen J.F. Debonding failures of RC beams strengthened with externally bonded FRP reinforcement: behaviour and modeling // *APFIS 2007*. 2007. Pp. 33-42.
21. Bokarev S.A., Kostenko A.N., Smerdov D.N., Nerovnykh A.A. Eksperimentalnye issledovaniia pri ponizhennykh i povyshennykh temperaturakh zhelezobetonnykh obraztsov, usilennykh polimernymi kompozitsionnymi materialami [Experimental studies of reinforced with polymer composites ferroconcrete specimens at low and high temperatures]. [Online]. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. 2013. Vol. 3. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/94tvn313.pdf> (date of application: 08.12.2022).
22. Polskoy P.P., Vasilenko N.V., Meretukov Z.A. O vliianii modulia uprugosti kompozitnykh materialov na prochnost i deformativnye svoystva usilennykh konstrukttsii [Effect of the FRP elastic modulus on the strength and deformation properties of RC structures]. [Online]. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal «Inzhenernyi vestnik Dona»*. 2019. Vol. 8. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vliyanii-modulya-uprugosti-kompozitnykh-materialov-na-prochnost-i-deformativnye-svoystva-usilennykh-konstrukttsiy/viewer> (date of application: 08.12.2022). (rus).
23. Smerdov D.N., Yashchuk M.O. Eksperimentalnye issledovaniia nesushchei sposobnosti izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, usilennykh prednapriazhennymi polimernymi kompozitsionnymi materialami [Experimental studies of the load-carrying capacity of flexible reinforced concrete elements strengthened by prestressed polymer composites]. *ussian Journal of Building Construction and Architecture*. 2019. Vol. 3. No. 55. Pp. 72-83. (rus). doi: [10.25987/VSTU.2019.55.3.008](https://doi.org/10.25987/VSTU.2019.55.3.008)
24. Zhang Ah., Jin Wl., Li Gb. Behavior of preloaded RC beams strengthened with CFRP laminates. *J. Zhejiang Univ. - Sci*. 2006. Vol. 7. No. 3. Pp. 436-444. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A0436>



25. Parikh K. Modhera C.D. Application of GFRP on preloaded retrofitted beam for enhancement in flexural strength. International journal of civil and structural engineering. 2012. Vol. 2. No. 4. Pp.1070-1080.
26. Rimshin V.I., Merkulov S.I., Esipov S.M. Betonnye konstrukticii, usilennye kompozitnym materialom [Concrete structures reinforced by composite material]. Vestnik Inzhenernoi shkoly DVFU, FEFU: School of Engineering Bulletin. 2018. Vol. 2. No. 35. Pp. 93-100. (rus). doi.org/10.5281/zenodo.1286034
27. Bykov A., Shardakov I., Shestakov A. Determination of thermography modes for recording delamination between composite material and reinforced concrete structures // Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena. 2015. No. 243. Pp. 97-104. doi:[10.4028/www.scientific.net/SSP.243.97](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.243.97)
28. ACI 440.2R-08. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI. 2008.
29. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Rome. 2004.
30. Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheet // Concrete Engineering Series 41. Japan Society of Civil Engineers. 2001.
31. Teng J.G., Smith S.T., Yao J., Chen J.F. Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs. Construction and Building Materials. 2003. Vol. 17. Issues 6-7. Pp. 447-462.
32. Lu X.Z., Teng J.G., Ye L.P., Jiang J.J. Intermediate crack debonding in FRP-strengthened RC beams: FE analysis and strength model. Journal of Composites for Construction. 2007. No. 11(2). Pp.161-174. doi:[10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2007\)11:2\(161\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2007)11:2(161))
33. Said H., Wu Z. Evaluating and proposing models of predicting IC debonding failure // Journal of Composites for Construction. 2008. Vol. 12. Issue 3. Pp. 284-299. doi:[10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:3\(284\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:3(284))
34. Russian Building Codes SP 164.1325800.2014. Usilenie zhelezobetonnykh konstrukticii kompozitnymi materialami. Pravila proektirovaniia [Reinforcement of reinforced concrete structures with composite materials. Design rules]. (rus).
35. Nerovnykh A.A. Avtoreferat. Sovershenstvovanie metodiki otcenki gruzopodemnosti zhelezobetonnykh proletnykh stroenii zheleznodorozhnykh mostov, usilennykh kompozitcionnymi materialami. [Abstract of the dissertation. Improving the methodology for assessing the load capacity of reinforced concrete superstructures of railway bridges reinforced with composite materials. Abstract. Improvement of the methodology for assessing the load capacity of reinforced concrete superstructures of railway bridges reinforced with composite materials]. Novosibirsk. 2013. (rus).

#### Информация об авторах:

##### **Быков Антон Алексеевич**

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных конструкций и вычислительной механики.  
E-mail: [violentharp@yandex.ru](mailto:violentharp@yandex.ru)

##### **Шардаков Игорь Николаевич**

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией интеллектуального мониторинга.  
E-mail: [shardakov@icmm.ru](mailto:shardakov@icmm.ru)

##### **Шестаков Алексей Петрович**

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник.  
E-mail: [shap@icmm.ru](mailto:shap@icmm.ru)

##### **Глот Ирина Олеговна**

«Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» - филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, Россия, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.  
E-mail: [glot@icmm.ru](mailto:glot@icmm.ru)

**Information about authors:**

**Bykov Anton A.**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia,  
candidate of technical science, associate professor of the department of building structures and computational mechanics.

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

**Shardakov Igor N.**

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia,  
doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of the Intelligent Monitoring Laboratory.

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

**Shestakov Aleksey P.**

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia,  
candidate of physical and mathematical sciences, researcher.

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

**Glott Irina O.**

Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russia,  
candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher.

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

С.Ю. КАЛАШНИКОВ<sup>1,2</sup>, Е.В. ГУРОВА<sup>1</sup>, Н.Г. БАНДУРИН<sup>1</sup><sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия<sup>2</sup>Центральный научно-исследовательский и проектный институт Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, г. Москва, Россия

## ПРОДОЛЬНОЕ СЖАТИЕ СТЕРЖНЯ С НАЧАЛЬНОЙ ПОГИБЬЮ, ПРИОБРЕТАЮЩЕГО НАВЕДЕННУЮ АНИЗОТРОПИЮ

**Аннотация.** Рассматривается центрально сжатый гибкий прямолинейный стальной стержень. Вследствие имеющегося начального несовершенства в виде погиби стержень работает как сжато-изогнутый. Неоднородность напряженного состояния от изгиба приводит к стеснению деформаций, вызывающих изменение упругих характеристик материала. Для получения уравнения стержня в отклоненном состоянии используется предложенная ранее авторами инкрементальная теория нелинейного деформирования тел в неоднородных полях напряжений с индуцированной анизотропией свойств. Неоднородность поля напряжений вызывает переменность упругих характеристик материала, приводящих вследствие индуцированной инкрементальной криволинейной анизотропии к изменению расчетных параметров конструкции. Решение строится на численной реализации уравнения изогнутой оси с применением метода переменного параметра упругости. Анализируется рост прогибов на ступенях последовательного нагружения возрастающей силой. Рассмотрены различные варианты начальных кривизн, в том числе и исчезающее малой. Независимо от величины начального прогиба установлено заметное увеличение сжимающей силы, отвечающей значительному нарастанию прогибов по сравнению с бифуркационным подходом.

**Ключевые слова:** индуцированная анизотропия, продольный изгиб, градиент напряжений, инкрементальные соотношения, начальная погибь.

S.Y. KALASHNIKOV<sup>1,2</sup>, E.V. GUROVA<sup>1</sup>, N.G. BANDURIN<sup>1</sup><sup>1</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia<sup>2</sup>Central Research and Design Institute of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, Moscow, Russia

## LONGITUDINAL COMPRESSION OF A ROD WITH AN INITIAL LOSS ACQUIRING INDUCED ANISOTROPY

**Abstract.** A centrally compressed flexible rectilinear steel rod is considered. Due to the existing initial imperfection in the form of a perish, the rod works as a compressed-curved one. The inhomogeneity of the stress state from bending leads to the constraint of deformations that cause a change in the elastic characteristics of the material. To obtain the equation of the rod in the deflected state, the incremental theory of nonlinear deformation of bodies in inhomogeneous stress fields with induced anisotropy of properties proposed earlier by the authors is used. The inhomogeneity of the stress field causes the variability of the elastic characteristics of the material, which, due to the induced incremental curvilinear anisotropy, lead to a change in the design parameters of the structure. The solution is based on the numerical implementation of the curved axis equation using the method of variable elasticity parameter. The growth of deflections at the stages of sequential loading with increasing force is analyzed. Various variants of initial curvatures, including vanishing small ones, are considered. Regardless of the magnitude of the initial deflection, a noticeable increase in the compressive force was found, corresponding to a significant increase in deflections compared to the bifurcation approach.

**Keywords:** induced anisotropy, longitudinal bending, stress gradient, incremental ratios, initial loss.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Xiao Y., Zhang Z., Wang J. Granular hyperelasticity with inherent and stress-induced anisotropy. *Acta Geotech.* 15, 671–680 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00768-z>
2. Бусько В.Н., Осипов А.А. Применение магнитошумового метода для контроля механической анизотропии ферромагнитных материалов // *Приборы и методы измерений.* 2019. Т. 10. № 3. С. 281–292. doi:10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292
3. Попович А.А., Суфияров В.Ш., Борисов Е.В., Полозов И.А., Масайло Д.В., Григорьев А.В. Анизотропия механических свойств изделий, изготовленных методом селективного лазерного плавления порошковых материалов // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* 2016. №3. С.4-11. doi:dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-4-11.
4. Ельцов Р.И. Разработка технологического процесса изготовления сварных конструкций // *Строительные материалы и изделия.* 2021. Том 4. № 5. С.35-44.
5. Одесский П.Д., Гурьева Е.С. Влияние пластической деформации на анизотропию механических свойств стальных листов большой толщины для строительных конструкций // *Строительная механика и расчет сооружений.* 1991. № 1. С.70-77.
6. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Волкова Л.В. Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба. *Сталь.* 2016. № 10. С. 75-79.
7. Finelli A., Labanti M. Analysis of the influence of the anisotropy induced by cold rolling on duplex and super-austenitic stainless steels // *Frattura ed Integrità Strutturale.* 2010. Iss 13. P. 24-30.
8. Loginov Y.N., Puzanov M.P. Influence of properties anisotropy on stress-deformed state at rolling stripes from electrical steel // *Chernye Metally.* 2018. Iss. 10. P. 22-27.
9. Устинов К.Б.. О наведенной анизотропии механических свойств эластомеров // *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела.* 2019. №5. С.27-36. doi:10.1134/S0572329919050167
10. Experimental analysis of the effect of carbon nanoparticles with different geometry on the appearance of anisotropy of mechanical properties in elastomeric composites / К.А. Mokhireva, А. Svistkov, Vladislav N. Solod'ko, L. Komar, K. Stöckelhuber // *Polymer testing.* 2017. Т. 59. С. 46-54. doi:10.1016/j.polymertesting.2017.01.007
11. Шадрин В.В., Мохирева К.А., Комар Л.А. Анизотропия механических свойств наполненных вулканизаторов под воздействием внешней нагрузки. – *Вестник Пермского федерального исследовательского центра.* 2017. № 1. С. 93-98.
12. Корнеев С.А., Корнеев В.С., Романюк Д.А. Математическое моделирование эффекта наведенной деформационной анизотропии резинокордного упругого элемента плоской муфты. – *Омский научный вестник.* 2017. № 3(153). С. 10-15.
13. Комар Л.А., Мохирева К.А., Морозов И.А.. Исследование появления анизотропных свойств полимерных нанокомпозитов в результате предварительного деформирования в условиях двухосного нагружения.- *Вестник Пермского федерального исследовательского центра.* 2017. № 2. С. 61-66.
14. Калашников С.Ю. Экспериментальная проверка модели деформирования материала в условиях неоднородного напряжённого состояния: монография. ВолгГТУ. Волгоград, 2017. 80 с.
15. Колчунов В.И., Федоров В.С. Понятийная иерархия моделей в теории сопротивления строительных конструкций // *Промышленное и гражданское строительство.* 2020. № 8. С. 16-23. doi:10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.
16. Петров В.В. Инкрементальные уравнения механики деформируемого тела в полных функциях. *Вестник отделения строительных наук. Вып.14: в 2 т. Т.1. РААСН Иван. гос. архит.-стр. ун-т. М. Иваново, 2010. С. 159-166.*
17. Зиновьев А.С. Напряженно-деформированное состояние системы "плита - слой основания" на базе инкрементальной модели деформирования // *Вестник Саратовского государственного технического университета.* 2009. Вып. 1(37). С. 27-33.
18. Модель деформирования железобетона в приращениях и расчет балок-стенок и изгибаемых плит с трещинами : монография / Н.И. Карпенко [и др.]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования Петрозав. гос. ун-т. - Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2013. 153 с.
19. Петров В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика. М.: Инфра. Инженерия, 2014. 480 с.
20. Купавцев В.В. Базисные функции метода двусторонних оценок в задачах устойчивости упругих неоднородно сжатых стержней. *Вестник МГСУ.* № 6. С. 63-70.
21. Инкрементальная модель для исследования устойчивости высотного сооружения на неоднородном основании / Иноземцев В.К., Синева Н.Ф., Иноземцева О.В. // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* 2008. №2. С. 41-46.
22. About the Distortion Model of Operational Compressed-Bent Bars with Induced Anisotropy / С.Ю. Калашников, Е.В. Гурова, Р.Х. Курамшин, Б. Языев // *International Scientific Conference on Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies (Moscow 26 November 2021) / eds.: А. Ginzburg, G. Kashevarova. - Springer, Cham, 2022. Vol. 231. P. 95-102. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7_10).*

23. Калашников С.Ю., Гурова Е.В., Шведов Е.Г. Применение метода Бубнова - Галеркина для анализа деформирования сжато-изогнутого стержня с индуцированной анизотропией // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. Вып. 1 (86). С. 132-144.
24. Бандурин Н.Г., Калашников С.Ю. Метод и пакет программ для численного решения систем существенно нелинейных интегро-дифференциально-алгебраических уравнений (корректные по Адамару двумерные и трехмерные краевые задачи) // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19. № 5. С. 3-11.
25. Бандурин Н.Г., Калашников С.Ю. Численный метод и программа для определения критического состояния упругого стержня переменной жесткости в общем случае закрепления его концов // Строительство и реконструкция. 2015. № 2. С. 4-11.
26. Бандурин Н.Г., Калашников С.Ю. Расчёт сжатых стоек в составе простых плоских рам с помощью компьютерной программы и сравнение результатов с расчётами по СП 16.13330.2011 «Стальные конструкции» // Вестник Волгоградского гос. архит.-строит. ун-та. Сер. Строительство и архитектура. 2016. № 46 (65). С. 48-57.
27. Вольмир А.С. Устойчивость упругих систем. М.: Физматгиз, 1963. 880 с.

## REFERENCES

1. Xiao Y., Zhang Z., Wang J. Granular hyperelasticity with inherent and stress-induced anisotropy. *Acta Geotech.* 15, 671–680 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00768-z>
2. Bus'ko V.N., Osipov A.A. Primenenie magnitoshumovogo metoda dlya kontrolya mekhanicheskoy anizotropii ferromagnitnykh materialov // *Pribory i metody izmerenij.* 2019. T. 10. No. 3. Pp. 281–292. doi:10.21122/2220-9506-2019-10-3-281-292
3. Popovich A.A., Sufiyarov V.SH., Borisov E.V., Polozov I.A., Masajlo D.V., Grigor'ev A.V. Anizotropiya mekhanicheskikh svojstv izdelij, izgotovlennykh metodom selektivnogo lazernogo plavlenniya poroshkovykh materialov // *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funkcional'nye pokrytiya.* 2016. No. 3. Pp. 4-11. doi:dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-3-4-11.
4. El'cov R.I. Razrabotka tekhnologicheskogo processa izgotovleniya svarnykh konstrukcij // *Stroitel'nye materialy i izdeliya.* 2021. Tom 4. No. 5. Pp. 35-44.
5. Odesskij P.D., Gur'eva E.S. Vliyanie plasticheskoy deformatsii na anizotropiyu mekhanicheskikh svojstv stal'nykh listov bol'shoj tolshchiny dlya stroitel'nykh konstrukcij // *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij.* 1991. No.1. Pp. 70-77.
6. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Volkova L.V. Vliyanie anizotropii mekhanicheskikh svojstv tonkolistovogo stal'nogo prokata na informativnye parametry voln Lemba. *Stal'.* 2016. No. 10. Pp. 75-79.
7. Finelli A., Labanti M. Analysis of the influence of the anisotropy induced by cold rolling on duplex and super-austenitic stainless steels // *Frattura ed Integrità Strutturale.* 2010. Iss 13. Pp. 24-30.
8. Loginov Y.N., Puzanov M.P. Influence of properties anisotropy on stress-deformed state at rolling stripes from electrical steel // *Chernye Metally.* 2018. Iss. 10. Pp.22-27.
9. Ustinov K.B. O navedennoj anizotropii mekhanicheskikh svojstv elastomerov // *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Mekhanika tverdogo tela.* 2019. No. 5. Pp. 27-36. doi:10.1134/S0572329919050167
10. Experimental analysis of the effect of carbon nanoparticles with different geometry on the appearance of anisotropy of mechanical properties in elastomeric composites / K.A. Mokhireva, A. Svistkov, Vladislav N. Solod'ko, L. Komar, K. Stöckelhuber // *Polymer testing.* 2017. T. 59. Pp. 46-54. doi:10.1016/j.polymertesting.2017.01.007
11. SHadrin V.V., Mohireva K.A., Komar L.A. Anizotropiya mekhanicheskikh svojstv napolnennykh vulkanizatorov pod vozdejstviem vneshnej nagruzki. – *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo centra.* 2017. No. 1. Pp. 93-98.
12. Korneev S.A., Korneev V.S., Romanyuk D.A. Matematicheskoe modelirovanie efekta navedennoj deformacionnoj anizotropii rezinokordnogo uprugogo elementa ploskoj mufty. – *Omskij nauchnyj vestnik.* 2017. No. 3(153). Pp. 10-15.
13. Komar L.A., Mohireva K.A., Morozov I.A. Issledovanie poyavleniya anizotropnykh svojstv polimernykh nanokompozitov v rezul'tate predvaritel'nogo deformirovaniya v usloviyah dvuhosnogo nagruzheniya.- *Vestnik Permskogo federal'nogo issledovatel'skogo centra.* 2017. No. 2. Pp.61-66.
14. Kalashnikov S.YU. Eksperimental'naya proverka modeli deformirovaniya materiala v usloviyah neodnorodnogo napryazhonnogo sostoyaniya: monografiya. VolgGTU. Volgograd, 2017. 80 p.
15. Kolchunov V.I., Fedorov V.S. Ponyatijnaya ierarhiya modelej v teorii soprotivleniya stroitel'nykh konstrukcij // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo.* 2020. No. 8. Pp. 16-23. doi:10.33622/0869-7019.2020.08.16-23.
16. Petrov V.V. Inkremental'nye uravneniya mekhaniki deformiruемого tela v polnykh funkciyah. *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk. Vyp.14: v 2 t. T.1. RAASN Ivan. gos. arhit.-str. un-t. M. Ivanovo,* 2010. Pp. 159-166.
17. Zinov'ev A.S. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sistemy "plita - sloj osnovaniya" na baze inkremental'noj modeli deformirovaniya // *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2009. Vyp. 1(37). Pp. 27-33.
18. Model' deformirovaniya zhelezobetona v prirashcheniyah i raschet balok-stenok i izgibaemykh plit s treshchinami : monografiya / N.I. Karpenko [i dr.]; M-vo obrazovaniya i nauki Ros. Federacii, Feder. gos. byudzhet. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovaniya Petrozav. gos. un-t. - Petrozavodsk : Izd-vo PetrGU, 2013. 153 p.

19. Petrov V.V. Nelinejnaya inkremental'naya stroitel'naya mekhanika. M.: Infra – Inzheneriya, 2014. 480 p.
20. Kupavcev V.V. Bazisnye funkicii metoda dvustoronnih ocenok v zadachah ustojchivosti uprugih neodnorodno szhatyh sterzhnej. Vestnik MGSU. No. 6. Pp. 63-70.
21. Inkremental'naya model' dlya issledovaniya ustojchivosti vysotnogo sooruzheniya na neodnorodnom osnovanii / Inozemcev V.K., Sineva N.F., Inozemceva O.V. // Stroitel'naya mekhanika inzhenernyh konstrukcij i sooruzhenij. 2008. No. 2. Pp. 41-46.
22. About the Distortion Model of Operational Compressed-Bent Bars with Induced Anisotropy / S.YU. Kalashnikov, E.V. Gurova, R.H. Kuramshin, B. YAzyev // International Scientific Conference on Building Life-cycle Management. Information Systems and Technologies (Moscow 26 November 2021) / eds.: A. Ginzburg, G. Kashevarova. - Springer, Cham, 2022. Vol. 231Pp. 95-102. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96206-7_10).
23. Kalashnikov S.YU., Gurova E.V., SHvedov E.G. Primenenie metoda Bubnova - Galerkina dlya analiza deformirovaniya szhato-izognutogo sterzhnya s inducirovannoj anizotropiej // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. 2022. Vyp. 1 (86). Pp. 132-144.
24. Bandurin N.G., Kalashnikov S.YU. Metod i paket programm dlya chislennogo resheniya sistem sushchestvenno nelinejnyh integro-differencial'no-algebraicheskikh uravnenij (korrektnye po Adamaru dvumernye i trekhmernye kraevye zadachi) // Vychislitel'nye tekhnologii. 2014. T. 19. No. 5. Pp. 3-11.
25. Bandurin N.G., Kalashnikov S.YU. CHislennyj metod i programma dlya opredeleniya kriticheskogo sostoyaniya uprugogo sterzhnya peremennoj zhestkosti v obshchem sluchae zakrepleniya ego koncov // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2015. No. 2. Pp. 4-11.
26. Bandurin N.G., Kalashnikov S.YU. Raschyot szhatyh stoev v sostave prostyh ploskih ram s pomoshch'yu komp'yuternoj programmy i sravnenie rezul'tatov s raschyotami po SP 16.13330.2011 «Stal'nye konstrukcii» // Vestnik Volgogradskogo gos. arhit.-stroit. un-ta. Ser. Stroitel'stvo i arhitektura. 2016. No. 46 (65). Pp. 48-57.
27. Vol'mir A.S. Ustojchivost' uprugih sistem. M.: Fizmatgiz, 1963. 880 p.

#### **Информация об авторах:**

**Калашников Сергей Юрьевич**

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия, советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экспертиза и эксплуатация объектов недвижимости».

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

**Гурова Елена Владимировна**

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия, кандидат технических наук, доцент кафедры «Экспертиза и эксплуатация объектов недвижимости».

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

**Бандурин Николай Григорьевич**

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, основания и надежность сооружений».

E-mail: [bandurin\\_ng@mail.ru](mailto:bandurin_ng@mail.ru)

#### **Information about the authors:**

**Kalashnikov Sergey Yu.**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, Advisor to the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Examination and Operation of Real Estate objects".

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

**Gurova Elena V.**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Examination and Operation of Real Estate objects".

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

**Bandurin Nikolay G.**

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Building Structures, Foundations and Reliability of Structures".

E-mail: [bandurin\\_ng@mail.ru](mailto:bandurin_ng@mail.ru)

В.И. КОЛЧУНОВ<sup>1,2</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (НИИСФ), г. Москва, Россия

## МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**Аннотация.** Рассмотрена модель пластичности железобетонных конструкций, построенная на преобразованиях интенсивности связи «напряжений - деформаций», путем проецирования тензоров этой связи, используя специальные переходы для главного угла деформаций, суммарных деформации сдвига и др. При этом определен модуль пластичности бетона, коэффициент поперечных деформаций и построены сложные функции для линейных и угловых деформаций в сечениях, учитывающие депланацию, градиенты-деформаций при образовании трещин и изменениях жесткости. Принятые для расчетной модели гипотезы определяют распределение силовых потоков – блоков для сжатого и растянутого бетона (первый объект), «магистральные трещины» из механики разрушения железобетона, сложные функции и двухконсольный элемент для моделирования деформационного эффекта железобетона, разработанного автором (второй объект). Сопротивление растянутого бетона передается на рабочую арматуру и моделируются с использованием суммарными средними значениями продольного и поперечного усилия, а также среднего приведенного коэффициента растянутого бетона. «Нагельный» эффект в арматуре пересекаемой трещиной получен с помощью модели второго уровня строительной механики для арматурного стержня с двумя зацементированными концами. Моделируется раскрытие трещины и сдвиг берегов трещины. Главный вектор усилий в арматуре характеризуется величинами продольных и поперечных перемещений (третий объект).

В сложном напряженном железобетонном элементе с пространственными трещинами матрица жесткости получена аппроксимацией прямоугольных поперечных сечений малыми квадратами.

**Ключевые слова:** модель пластичности, принцип, бетон, объекты железобетона, среда, макротрещины, дилатации.

V.I. KOLCHUNOV<sup>1</sup><sup>1</sup>Southwestern State University, Kursk, Russia<sup>2</sup>Scientific Research Institute of Construction Physics RAACS, Moscow, Russia

## PLASTICITY MODEL OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

**Abstract.** A model of plasticity of reinforced concrete structures is considered, based on the transformations of the intensity of the “stress-strain” connection by projecting the tensors of this connection, using special transitions for the main angle of deformations, total shear deformations, etc.). At the same time, the modulus of plasticity of concrete, the coefficient of transverse deformations are determined, and complex functions are constructed for linear and angular deformations in sections, taking into account deformation, gradients of deformations during the formation of cracks and stiffness changes. The hypotheses adopted for the calculation model determine the distribution of force flows - blocks for compressed and stretched concrete (first object), "main cracks" from the mechanics of destruction of reinforced concrete, complex functions and a two-cantilever element for modeling the deformation effect of reinforced concrete, developed by the author (second object). Tensile concrete resistance is transferred to the working reinforcement and is modeled using the sum of the average values of the longitudinal and transverse forces, as well as the average reduced coefficient of tension concrete. The "pin (nagel)" effect in the reinforcement crossed by a crack was obtained using the model of the second level of structural mechanics for a reinforcing bar with two pinched ends. The opening of the crack and the shift of the crack edges are simulated. The main force vector in the reinforcement is characterized by the values of longitudinal and transverse displacements (the third object).

**Keywords:** plasticity model, principle, concrete, objects of reinforced concrete, environments, macrocracks, dilatations.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М.: АСВ, 2004. 472 с.
2. Гольшев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона. К.: Основа, 2009. 432 с.
3. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 410 с.
4. Верюжский Ю.В., Гольшев А.Б., Колчунов В.И., Ключева Н.В., Лисицин Б.М., Машков И.Л., Яковенко И.А. Справочное пособие по строительной механике. В двух томах.: Учебное пособие. М.: Изд-во АСВ, 2014. 432 с.
5. Колчунов В.И., Федоров В.С. Понятийная иерархия моделей в теории сопротивления строительных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 8. С. 16-23. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.08.16-23>.
6. Верюжский Ю.В., Колчунов В.И. Методы механики железобетона. Учебное пособие. - К.: Книжное издательство НАУ, 2005. 653 с.
7. Травуш В.И., Карпенко Н.И., Колчунов В.И., Каприелов С.С., Демьянов А.И., Конорев А.В. Результаты экспериментальных исследований конструкций квадратного и коробчатого сечений из высокопрочного бетона при кручении с изгибом // Строительство и реконструкция. 2018. № 6(80). С. 32-43.
8. Баширов Х.З., Колчунов В.И., Федоров В.С., Яковенко И.А. Железобетонные составные конструкции зданий и сооружений. М.: АСВ, 2017. 248 с.
9. Гольшев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетонных конструкций, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях (монография). Киев: Основа, 2010, 286 с.
10. Гольшев А.Б., Колчунов В.И., Яковенко И.А. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях. Киев: Талком, 2015. 371 с.
11. Петров В.В. Нелинейная инкрементальная строительная механика. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 480 с.
12. Петров В.В., Селяев П.В. Инкрементальная модель взаимодействия нелинейно деформируемых материалов с агрессивными средами // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций. Саранск: Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2014. С. 145-151.
13. Петров В.В. Методы выделения главной части решения при расчете нелинейно деформируемых балок // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 3(61). С. 160-169.
14. Колчунов В.И. Физическая суть сопротивления бетона и железобетона от дислокаций до трещин // Строительство и реконструкция. 2022. № 4(102). С. 15-35.
15. Генийев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В., Никулин А.И., Пятикрестовский К.П. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях. М.: АСВ, 2004. 216 с.
16. Генийев Г.А., Киссюк В.Н., Тюпин Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974, 316 с.
17. Пособие по проектированию предварительно напряженных железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов (к СНиП 2.03.01-84\*). – Часть 2. М.: ЦИТП Госостя СССР, 1988. 144 с.
18. Колчунов В.И., Демьянов А.И., Протченко М.В. Моменты в железобетонных конструкциях при изгибе с кручением // Строительство и реконструкция. 2021. № 3 (95). С. 25-44.
19. Колчунов В.И., Аль-Хашими О.И., Протченко М.В. Жесткость железобетонных конструкций при изгибе поперечной и продольной силами // Строительство и реконструкция. 2021. № 6(98). С. 5-19.
20. Боришанский М.С. Расчет железобетонных элементов при действии поперечных сил // Расчет и конструирование элементов железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1964. С. 122-143.

## REFERENCES

1. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Calculation models of the force resistance of reinforced concrete. M.: ASV, 2004. 472 p.
2. Golshev A.B., Kolchunov V.I. Reinforced concrete resistance. K: Osnova, 2009. 432 p.
3. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. M.: Stroyizdat, 1996. 410 p.
4. Veryuzhsky Yu.V., Golshev A.B., Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Lisitsin B.M., Mashkov I.L., Yakovenko I.A. Reference manual on structural mechanics. In two volumes. M.: ASV, 2014. 432 p.
5. Kolchunov V.I., Fedorov V.S. Conceptual hierarchy of models in the theory of resistance of building structures // Industrial and civil engineering. 2020. No. 8. Pp. 16–23.
6. Veryuzhskij YU.V., Kolchunov V.I. Methods of mechanics of reinforced concrete. K.: NAU, 2005. 653 p.
7. Travush V.I., Karpenko N.I., Kolchunov V.I., Kaprielov S.S., Demyanov A.I., Konorev A.V. The results of experimental studies of structures square and box sections in torsion with bending // Building and reconstruction. 2018. No. 6(80). Pp. 32-43.
8. Bashirov H.Z., Kolchunov V.I., Fedorov V.S., Yakovenko I.A. Reinforced Concrete Composite Structures of Buildings and Structures. M.: ABC, 2017. 248 p.



9. Golyshev A.B., Kolchunov V.I. Resistance of reinforced concrete structures erected in complex engineering and geological conditions. Kiev: Osnova, 2010. 286 p.
10. Golyshev A.B., Kolchunov V.I., Yakovenko I.A. Resistance of reinforced concrete structures, buildings and structures erected in complex engineering and geological conditions. Kiev: Talkom, 2015. 371 p.
11. Petrov V.V. Nonlinear incremental structural mechanics. Moscow: Infra-Engineering, 2014. 480 p.
12. Petrov V.V., Selyaev P.V. Incremental Model of Interaction of Nonlinearly Deformable Materials with Aggressive Medium // Durability of Building Materials, Products and Constructions. Saransk: N.P. Ogarev Mordovian State University, 2014. Pp. 145-151.
13. Petrov V.V. Methods of selecting the main part of the solution in the calculation of nonlinearly deformed beams // Bulletin of the Saratov State Technical University. 2011. No. 3(61). Pp. 160-169.
14. Kolchunov V.I. Physical essence of resistance of concrete and reinforced concrete from dislocations to cracks // Building and reconstruction. 2022. No. 4(102). Pp. 15-35.
15. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Nikulin A.I., Pyatikrestovsky K.P. Strength and Deformability of Reinforced Concrete Structures under Beyond Design Influences. Moscow: ABC, 2004. 216 p.
16. Geniev G.A., Kissyuk V.N., Tyupin G.A. Theory of Plasticity of Concrete and Reinforced Concrete. M.: Stroyizdat, 1974. 316 p.
17. Design Guide for Prestressed Reinforced Concrete Structures of Heavy and Light Concrete (to SNiP 2.03.01-84\*). - Part 2. M. Moscow: Central Institute of Reinforced Concrete of the USSR State Committee for Standardization, 1988. 144 p.
18. Kolchunov V.I., Demyanov A.I., Protchenko M.V. Moments in reinforced concrete structures under bending with torsion // Construction and Reconstruction. 2021. No. 3 (95). Pp. 25-44.
19. Kolchunov V.I., Al-Hashimi O.I., Protchenko M.V. Stiffness of reinforced concrete structures under bending with transverse and longitudinal forces // Building and Reconstruction. 2021. No. 6(98). Pp. 5-19.
20. Borishansky M.S. Calculation of reinforced concrete elements under the action of transverse forces // Calculation and design of elements of reinforced concrete structures. M.: Stroyizdat, 1964. Pp. 122-143.

### Информация об авторе:

#### **Колчунов Владимир Иванович**

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск, Россия,  
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры уникальных зданий и сооружений.

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, г. Москва, Россия,  
главный научный сотрудник.

E-mail: [vlik52@mail.ru](mailto:vlik52@mail.ru)

### Information about author:

#### **Kolchunov Vladimir Iv.**

Southwestern state university, Kursk, Russia,  
corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Unique Buildings and Structures.  
Scientific Research Institute of Construction Physics RAACS, Moscow, Russia,  
principal researcher.

E-mail: [vlik52@mail.ru](mailto:vlik52@mail.ru)

С.Н. КРИВОШАПКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Инженерная академия ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», г. Москва, Россия

## ПОВЕРХНОСТИ ДИАГОНАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ВЕЛАРОИДАЛЬНОГО ТИПА НА РОМБИЧЕСКОМ ПЛАНЕ

*Аннотация.* Статья иллюстрирует применение ранее полученных автором формул общего вида для описания поверхностей диагонального переноса суперэллипсов переменной кривизны на ромбическом плане. Дополнительно получены явные и параметрические уравнения для целой группы поверхностей диагонального переноса конгруэнтных суперэллипсов. В обоих случаях рассматриваются поверхности велароидального типа на ромбическом плане. Все предлагаемые поверхности визуализированы методами компьютерной графики. Благодаря наличию произвольных показателей степеней в явных уравнениях образующих суперэллипсов главного каркаса поверхности переноса конструирование поверхностей диагонального переноса расширено на случай использования плоских алгебраических кривых вместо суперэллипсов при задании главного каркаса проектируемых поверхностей диагонального переноса. Рассмотренные поверхности могут найти применение в архитектуре, строительстве, в машиностроении.

**Ключевые слова:** поверхность диагонального переноса, ромб, суперэллипс, велароидальная поверхность, главный каркас поверхности.

S.N. KRIVOSHAPKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

## SURFACES OF DIAGONAL TRANSLATION OF VELAROIDAL TYPE ON A RHOMBIC PLANE

*Abstract.* The paper illustrates the application of the formulae of general type derived by the author earlier for the definition of surfaces of diagonal translation of superellipses of variable curvature on a rhombic plane. Explicit and parametric equations were derived additionally for the large group of surfaces of diagonal translation of congruent superellipses. For the both cases, the surfaces of velaroidal type are examined on rhombic plane. All of presented surfaces were visualized with the help of methods of computer graphics. Due to availability of arbitrary exponents of powers in explicit equations of generatrix superellipses of the main frame of a translation surface, design of surfaces of diagonal translation was broadened for the case of using plane algebraic curves instead of superellipses in the process of choice of main frame of projected surface of diagonal translation. The presented surfaces can find the application in architecture, civil engineering, and in machine building.

**Keywords:** surface of diagonal translation, rhombus, superellipse, velaroidal surface, main frame of the surface, architecture of shells.

© Кривошапко С.Н., 2023

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karnevich V.V. Hydrodynamic surfaces with midship section in the form of the Lamé curves // RUDN Journal of Engineering Researches. 2021. 22(4): 323-328. doi:[10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328](https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328)
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](https://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-3-207-212)

3. Кривошапко С.Н., Алёшина О.О., Иванов В.Н. Статический расчет оболочек, очерченных по поверхностям с главным каркасом из трех заданных суперэллипсов // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2022. № 6 (305). С. 18–27. doi:10.37538/0039-2383.2022.6.18.27
4. Мамиева И.А., Карневич В.В. Геометрия и статический расчет тонких оболочек с линейчатыми срединными поверхностями с главным каркасом из трех суперэллипсов // *Строительство и реконструкция*. 2023. № 1(105). С. 16-27. doi:10.33979/2073-7416-2023-105-1-16-27.
5. Ma YQ, Wang CM, Ang KK. 2008. Buckling of superellipsoidal shells under uniform pressure // *Thin-Walled Structures*. 46(6): 584-591. doi:10.1016/j.fws.2008.01.013
6. Rosin P. Fitting superellipses // *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. No. 22 (7). Pp. 726–732. <https://doi.org/10.1109/34.865190>
7. Мамиева И.А. Линейчатые алгебраические поверхности с главным каркасом из трех суперэллипсов // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Том 18. № 4. С. 387-395. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-4-387-395
8. Страшнов С.В. Компьютерное моделирование новых форм строительных оболочек // *Геометрия и графика*. 2022. №. 4. С. 26-34. doi:<https://doi.org/10.12737/2308-4898-2022-10-4-26-34>
9. Абрамович Н.А., Нестерович Н.Д. Суперэллипс в экосистеме APPLE // *Материалы докладов 54-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов: в 2 т. УО "ВГТУ". Витебск, 2021. Том 2. С. 102-104. URI:<http://rep.vstu.by/handle/123456789/14813>*
10. Волков Г.Ф. Оболочка переноса отрицательной кривизны // *Армоцементные конструкции в строительстве*. Ленинград: Госстройиздат, 1963. С. 48 – 58.
11. Кривошапко С.Н., Иванов В.Н. Энциклопедия аналитических поверхностей. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 560 с. [ISBN 978-5-397-00985-0]
12. Алборова Л.А. [Возможности велароидальных оболочек](#)// В сб.: Инженерные системы. Труды научно-практической конференции с международным участием, посвященной 60-летию Российского университета дружбы народов. В 2-х томах. Под общей редакцией М.Ю. Мальковой. 2020. С. 59-65.
13. Krivoshapko S.N. Shell structures and shells at the beginning of the 21<sup>st</sup> century // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021. No. 17(6). С. 553-561. doi:10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561
14. 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. Том 18. № 3. С. 255-268. doi:10.22363/1815-5235-2022-18-3-255-268
15. Gil-oulbe Mathieu. Reserve of analytical surfaces for architecture and construction // *Building and Reconstruction*. 2021. No. 6 (98). Pp. 63-72. doi:10.33979/2073-7416-2021-98-6-63-72
16. Иванов В.Н., Шамбина С.Л. Зонтичные оболочки из отсеков циклических поверхностей переноса на различных типах базовых поверхностей вращения / *Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці Таврійський державний агротехнологічний університет*. Вип.4, т. 51. Мелітополь: ТДАТУ, 2011. С. 9 - 15.
17. Gray A. *Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica*. Boca Raton, FL: CRC Press. 2<sup>nd</sup> ed. 1998. 1053 p.
18. Elishakoff I., Elettro F. Interval, ellipsoidal, and super-ellipsoidal calculi for experimental and theoretical treatment of uncertainty: Which one ought to be preferred? // *International Journal of Solids and Structures*. 2015. 51. Pp. 1576-1586. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijstr.2014.01.010>
19. Tupikova E., Berdiev M. The comparison of velaroidal shell structures of square plane loadbearing properties // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. 883. 012218 (8) (PDF) Available from: <https://www.researchgate.net/publication/343109806> [accessed Mar 11 2023].
20. Krasic Sonja. *Geometrijske Površi u Arhitekturi*. Gradevinsko-arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu, 2012. 238 p. [ISBN 978-86-88601-02-3]
21. Козырева А.А., Рынковская М.И., Тупикова Е.М. Зонтичные оболочки для покрытия спортивного центра // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2017. Т. 18. № 1. С. 70 – 78. doi:10.22363/2312-8143-2017-18-1-70-78

## REFERENCES

1. Karnevich V.V. Hydrodynamic surfaces with midship section in the form of the Lamé curves. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021. 22(4): 323-328. doi:[10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328](https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-323-328)
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. 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)

4. Mamieva Iraida A., Karnevich Valery V. Geometry and static analysis of thin shells with ruled middle surfaces of three superellipses as main frame. *Building and Reconstruction*. 2023. No. 1(105). Pp. 16-27. doi:10.33979/2073-7416-2023-105-1-16-27.
5. Ma YQ, Wang CM, Ang KK. 2008. Buckling of superellipsoidal shells under uniform pressure. *Thin-Walled Structures*. 46(6): 584-591 doi:10.1016/j.fws.2008.01.013
6. Rosin P. Fitting superellipses. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. No. 22 (7). Pp. 726–732. <https://doi.org/10.1109/34.865190>
7. 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).
8. Strashnov S.V. Computer simulation of new forms of shell structures. *Geometry & Graphics*. 2022. No. 4. Pp. 26-34. doi:<https://doi.org/10.12737/2308-4898-2022-10-4-26-34>
9. Abramovich N.A., Nesterovich N.D. Superellipse in eco-system APPLE. *Materiali Dokladov 54<sup>th</sup> Intern. Nauchno-Tehnicheskoy Konferentsii Prepodavateley i Studentov. UO "BGTU". Vitebsk, 2021. Vol. 2. Pp. 102-104. URI: <http://rep.vstu.by/handle/123456789/14813>*
10. Volkov G.F. Translational shell of negative Gaussian curvature. *Armozementnie Konstruktzii v Stroitelstve [Reinforces Cement Structures in Building]*. Leningrad: Gosstroyizdat, 1963. Pp. 48-58. (rus).
11. Krivoschapko S.N., Ivanov V.N. *Encyclopedia of Analytical Surfaces*. Springer International Publishing Switzerland, 2015. 752 p. doi:10.1007/978-3-319-11773-7
12. Alborova L.A. Opportunities of velaroidal shells. In book: *Engineering Systems. Tr. Nauchno-Pract. Konf. s Mezhdunar. Uchastiem, Posvyaschennoy 60-Letiyyu RUDN*. Vol. 1. 2020. Pp. 59-65 (rus.) [ISBN 978-5-209-10101-7].
13. Krivoschapko S.N. Shell structures and shells at the beginning of the 21<sup>st</sup> century. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021. No. 17(6). Pp. 553-561. doi:10.22363/1815-5235-2021-17-6-553-561
14. Krivoschapko S.N. On the basic architectural styles, directions, and style flows for shells and shell structures. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022; 18(3): 255–268 (rus.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-255-268>
15. Gil-oulbe Mathieu. Reserve of analytical surfaces for architecture and construction. *Building and Reconstruction*. 2021. No. 6 (98). Pp. 63-72. doi:10.33979/2073-7416-2021-98-6-63-72
16. Ivanov V.N., Shambina S.L. Umbrella shells from the fragments of cyclic surfaces of translation on different types of basic surfaces of revolution. *Prikladnaya Geometriya ta Inzhenernaya Grafika. Pratzhi TDATU [Applied Geometry and Engineering Graphics. Proc. of TDATU]*. Iss. 4. Vol. 51. Melitopol: TDATU, 2011. Pp. 9-15.
17. Gray A. *Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica*. Boca Raton, FL: CRC Press. 2<sup>nd</sup> ed. 1998. 1053 p.
18. Elishakoff I., Eletto F. Interval, ellipsoidal, and super-ellipsoidal calculi for experimental and theoretical treatment of uncertainty: Which one ought to be preferred?. *International Journal of Solids and Structures*. 2015. 51. Pp. 1576-1586. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.01.010>
19. Tupikova E., Berdiev M. The comparison of velaroidal shell structures of square plane loadbearing properties. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. 883. 012218 (8) (PDF) Available from: <https://www.researchgate.net/publication/343109806> [accessed Mar 11 2023].
20. Krasic Sonja. *Geometrijske Površi u Arhitekturi*. Gradevinsko-arhitektonski fakultet Univerzitet u Nišu, 2012. 238 p. [ISBN 978-86-88601-02-3]
21. Kozyreva A.A., Rynkovskaya M.I., Tupikova E.M. Umbrella shells sports center cover. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2017. No. 18(1). Pp. 70 – 78. doi:10.22363/2312-8143-2017-18-1-70-78].

#### **Информация об авторе:**

**Кривошапко Сергей Николаевич**

Инженерная академия ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов», г. Москва, Россия,  
доктор технических наук, профессор, профессор-консультант департамента строительства ИА РУДН.  
E-mail: [sn.krivoschapko@mail.ru](mailto:sn.krivoschapko@mail.ru)

#### **Information about author:**

**Krivoshapko Sergey N.**

Engineering Academy of the Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia,  
DSc, Professor, Professor-tutor at the Civil Engineering Department of the EA of the RUDN University.  
E-mail: [sn.krivoschapko@mail.ru](mailto:sn.krivoschapko@mail.ru)

А.Н. МАМИН<sup>1,2</sup>, А.А. БАММАТОВ<sup>2</sup>, Н.С. ГОРДЕЕВ<sup>2</sup><sup>1</sup>АО «ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия<sup>2</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ С ПЕТЛЕВЫМИ СТЫКАМИ АРМАТУРЫ

**Аннотация.** В статье описана постановка задачи исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных монолитных конструкций с петлевыми стыками арматуры с применением метода конечных элементов. Представлен краткий обзор модели пластического повреждаемого бетона *concrete damaged plasticity*, описание основных ее параметров и их подбора на примерах задачи верификации математической модели материала результатами натурных испытаний бетонной призмы и балки с петлевым стыком над статической нагрузкой.

Представлено подробное описание параметров модели, диаграмм состояния бетона и арматуры, включая графики напряжения-деформации с учетом особенностей моделей, а также даны графики сопоставления экспериментального и численного исследования бетонной призмы и изгибаемой железобетонной балки с петлевым стыком, включающей помимо модели бетона, и модель арматуры.

В результате расчетов получены максимальные напряжения в арматуре 514 МПа, близкие к полученным в результате натурального эксперимента 550 МПа (рисунок 8). Величина прогиба при достижении разрушающей нагрузки в эксперименте составил 16.7 мм, в КЭ модели 18,07 мм.

**Ключевые слова:** петлевой стык арматуры, *concrete damaged plasticity*, диаграмма деформирования бетона, испытания статической нагрузкой, бетонная призма, изгибаемая железобетонная балка.

A.N. MAMIN<sup>1,2</sup>, A.A. BAMMATOV<sup>2</sup>, N.S. GORDEEV<sup>2</sup><sup>1</sup>АО «ЦНИИПромзданий», Moscow, Russia<sup>2</sup>Moscow State University of Civil Engineering (NIU MGSU), Moscow, Russia

## NUMERICAL SIMULATION OF STRUCTURES WITH LOOP JOINTS OF REBAR

**Abstract.** The article describes the statement of a problem of research of the stress-strain state of reinforced concrete monolithic structures with loop joints of rebar using the finite element method. A review of plastic damaged concrete model, a description of its basic parameters and their selection by the example of the problem of verification of mathematical material model by the results of full-scale tests of concrete prism and beam with a loop joint over a static load have been presented.

The detailed description of the model parameters, diagrams of concrete and reinforcement state, including stress-strain diagrams with regard to the models features, as well as graphs comparing the experimental and numerical research of a concrete prism and a bendable reinforced concrete beam with a loop joint, including a model of concrete, and reinforcement model are presented.

The results of numerical calculations obtained stresses in the reinforcement of 514 MPa, which is close to those resulting from the full-scale experiment of 550 MPa (Fig. 8). The value of deflection when the failure load in the experiment was 16.7 mm, in the FE model it was 18.07 mm.

**Keywords:** loop joint of rebar, concrete damaged plasticity, concrete deformation diagram, static load tests, concrete prism, flexural reinforced concrete beam.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бамматов А.А. и др. Петлевые стыки стержневой арматуры. История развития, проблемы и актуальность // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 6. С. 4-11.
2. Силантьев А.С. Расчет прочности наклонных сечений изгибаемых железобетонных элементов методом конечных элементов в КЭ-комплексах Ansys и Abaqus // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 2. С. 49-52.
3. Крылов А.С. Численные расчеты сталежелезобетонных балок с учетом контактного взаимодействия стального сердечника с бетоном // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. Т. 21. № 2. С. 175-184.
4. Krylov S. B. Contact technologies in design of reinforced concrete beams with cracks [Электронный ресурс] / S.B. Krylov, V.I. Travush, D.V. Konin, A.S. Krylov // *IOP Conference Series. VII International Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering 1–8 July 2018, Novosibirsk, Russian Federation: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 456.
5. Квасников А.А. Методика расчета взаимодействия бетона и арматуры железобетонных конструкций в программном комплексе Abaqus // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2019. №1. С. 65-70
6. Силантьев А.С., Лучкин Е.А. Моделирование стыка круглой колонны с плоской плитой с использованием комплекса" Abaqus" // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 10. С. 74-80.
7. Rahman R., Akbar I., Rofriantona R. 3D Finite Element Model for Shear-dominant Failure of Reinforced Concrete Beams // *Journal of Applied Materials and Technology*. 2021. Т. 3. № 1. С. 12-21.
8. Cervenka V. et al. Prediction of shear failure of large beams based on fracture mechanics // *Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanis of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-9, Prague, Czech Republic*. 2016. Т. 29.
9. Cervenka V., Dolezel J., Novak D. Shear failure of large lightly reinforced concrete beams. Part II– Assessment of global safety of resistance // *The 3rd International congress of the international federation for structural concrete (fib), Washington, DC, USA*. 2010.
10. Jendele L., Cervenka J. Finite element modelling of reinforcement with bond // *Computers & structures*. 2006. Т. 84. № 28. С. 1780-1791.
11. Genikomsou A.S., Polak M.A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS // *Engineering structures*. 2015. Т. 98. С. 38-48.
12. Байбурин А.Х. Раннее нагружение монолитных железобетонных конструкций // *Железобетонные конструкции*. 2023. Т. 2. № 2. С. 13–21.
13. Abaqus Documentation. Abaqus Analysis User's manual. Materials. Other plasticity models. Concrete.
14. Hillerborg A., Modéer M., Petersson P.E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements // *Cement and concrete research*. 1976. Т. 6. № 6. С. 773-781.
15. Lee J., Fenves G. L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures // *Journal of engineering mechanics*. 1998. Т. 124. № 8. С. 892-900.
16. Lubliner J. et al. A plastic-damage model for concrete // *International Journal of solids and structures*. 1989. Т. 25. № 3. С. 299-326.
17. Wahalathantri B. et al. A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS // *Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing. – Queensland University of Technology, 2011. С. 260-264.*
18. Chaudhari S.V., Chakrabarti M. A. Modeling of concrete for nonlinear analysis using finite element code ABAQUS // *International Journal of Computer Applications*. 2012. Т. 44. № 7. С. 14-18.
19. Hafezolghorani M. et al. Simplified damage plasticity model for concrete // *Structural Engineering International*. 2017. Т. 27. № 1. С. 68-78.
20. Николаев В.Б. и др. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций АЭС с модифицированными петлевыми стыками на крупномасштабных железобетонных моделях балочного типа // *Безопасность энергетических сооружений*. 2016. № 1. С. 66-81.
21. Николаев В.Б., Рубин О.Д., Селезнев С.В.. Расчет прочности и конструирование петлевых стыков сборных элементов // *Бетон и железобетон*. 1987. № 1. С. 38-40.
22. Климов Е.А., Николаев В.Б. Совершенствование методики расчета промышленных бесшварных петлевых стыков арматуры железобетонных конструкций ГЭС и АЭС по предельным состояниям // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2016. № 5. С. 3-10.

REFERENCES

1. Avdeev K.V., Mamin A.N., Bammatov A.A. et al. Loop Joints of Bar Reinforcement. The History of Development, Problems and Relevance // Construction and Reconstruction. 2022. No. 6. Pp. 4-11.
2. Silantiev A.C. Calculation of the Strength of Inclined Sections of Bending Reinforced Concrete Elements by Finite Element Method in Ansys and Abaqus Complexes // Industrial and Civil Engineering. 2012. No. 2. Pp. 49-52.
3. Krylov A.S. Numerical calculations of steel reinforced concrete beams taking into account the contact interaction of the steel core with concrete / A. S. Krylov // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2019. T. 21. No. 2. Pp. 175-184.
4. Krylov S.B. Contact technologies in design of reinforced concrete beams with cracks [Electronic resource] / S.B. Krylov, V.I. Travush, D.V. Konin, A.S. Krylov // IOP Conference Series. VII International Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering 1-8 July 2018, Novosibirsk, Russian Federation: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 456.
5. Kvasnikov A.A. Method of calculation of interaction of concrete and reinforcement of reinforced concrete structures in the software package Abaqus // Building Mechanics and Calculation of Structures. 2019. No. 1. Pp. 65-70
6. Silantiev A.S., Luchkin E.A. Modeling the joint of a round column with a flat plate using the complex "Abaqus" // Industrial and Civil Engineering. 2018. No. 10. Pp.74-80.
7. Rahman R., Akbar I., Rofriantona R. 3D Finite Element Model for Shear-dominant Failure of Reinforced Concrete Beams //Journal of Applied Materials and Technology. 2021. T. 3. No. 1. Pp. 12-21.
8. Cervenka V. et al. Prediction of shear failure of large beams based on fracture mechanics //Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanis of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-9, Prague, Czech Republic. 2016. T. 29.
9. Cervenka V., Dolezel J., Novak D. Shear failure of large lightly reinforced concrete beams. Part II– Assessment of global safety of resistance // The 3rd International congress of the international federation for structural concrete (fib), Washington, DC, USA. 2010.
10. Jendele L., Cervenka J. Finite element modelling of reinforcement with bond //Computers & structures. 2006. T. 84. No. 28. Pp. 1780-1791.
11. Genikomsou A.S., Polak M.A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS // Engineering structures. 2015. T. 98. Pp. 38-48.
12. Bayburin A.Kh. Early loading of monolithic reinforced concrete structures // Reinforced Concrete Structures. 2023. T. 2. No. 2. Pp.13-21.
13. Abaqus Documentation. Abaqus Analysis User's manual. Materials. Other plasticity models. Concrete.
14. Hillerborg A., Modéer M., Petersson P. E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements // Cement and concrete research. 1976. T. 6. No. 6. Pp.773-781.
15. Lee J., Fenves G. L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures // Journal of engineering mechanics. 1998. T. 124. No. 8. Pp. 892-900.
16. Lubliner J. et al. A plastic-damage model for concrete //International Journal of solids and structures. 1989. T. 25. No. 3. Pp. 299-326.
17. Wahalathantri B. et al. A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS // Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing. – Queensland University of Technology, 2011. Pp. 260-264.
18. Chaudhari S. V., Chakrabarti M. A. Modeling of concrete for nonlinear analysis using finite element code ABAQUS // International Journal of Computer Applications. 2012. T. 44. No. 7. Pp. 14-18.
19. Hafezolghorani M. et al. Simplified damage plasticity model for concrete //Structural Engineering International. 2017. T. 27. No. 1. Pp. 68-78.
20. Nikolaev V.B. et al. Experimental Investigations of Reinforced Concrete Structures of NPPs with Modified Loop Joints on Large-Scale Reinforced Concrete Beam Models // Bezopasnost energeticheskikh sooruzheniy. 2016. No. 1. Pp.66-81 (in Russian).
21. Nikolaev V.B., Rubin O.D., Seleznev S.V.. Calculation of Strength and Design of Loop Joints of Prefabricated Elements // Beton i jelozobeton. 1987. No. 1 Pp. 38-40. (in Russian).
22. Klimov E.A., Nikolaev V.B. Improvement of calculation methods of industrial non-welded loop joints of reinforcement of reinforced concrete structures of HPP and NPP on the limiting states // Stroitel'naya mekhanika ingenernih konstruksii i sooruzheniy. 2016. No. 5. (in Russian).

**Информация об авторах:**

**Мамин Александр Николаевич**

АО «ЦНИИПромзданий», г. Москва, Россия,

доктор технических наук, профессор, начальник отдела обследований зданий и сооружений.

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

профессор кафедры Железобетонные и каменные конструкции.

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

**Бамматов Арслан Асельдерович**

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

аспирант кафедры Железобетонные и каменные конструкции.

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

**Гордеев Никита Сергеевич**

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

студент.

E-mail: [gordey1999@list.ru](mailto:gordey1999@list.ru)

**Information about authors:**

**Mamin Aleksandr N.**

АО «CNIIPromzdaniy», Moscow, Russia,

doctor of technical Sciences, Professor, Head of the Department of Surveys of Buildings and Structures.

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

professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

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

**Bammatov Arslan As.**

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

postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

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

**Gordeev Nikita S.**

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

student.

E-mail: [gordey1999@list.ru](mailto:gordey1999@list.ru)



А.Г. ТАМРАЗЯН<sup>1</sup>

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

## К БЕЗОПАСНОМУ ЗНАЧЕНИЮ ДЛИТЕЛЬНОГО НАГРУЖЕНИЯ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*Аннотация.* В практике расчетов сжатых железобетонных элементов на статические воздействия ряд вопросов, важных для определения деформаций и несущей способности этих элементов, не имеют до сих пор окончательных и однозначных ответов. Прежде всего, это проблема достоверного учета длительного действия внешней нагрузки. В отличие от изгибаемых элементов несущая способность сжатых стержней зависит от времени пребывания их под нагрузкой.

В статье рассматриваются вопросы влияния гибкости, коэффициента армирования при длительном действии нагрузки на уменьшение несущей способности железобетонного сжатого стержня.

Предложена методика расчета для определения длительного сжимающего усилия, обеспечивающего заданный период безопасной эксплуатации железобетонных колонн.

Выявлена зависимость отношения уровня длительного действия к кратковременной разрушающей нагрузке на прогибы сжатых стержней.

Проведен анализ экспериментальных исследований, свидетельствующий о том, что величина этого отношения зависит от эксцентриситета продольной силы, а также данные по величине снижения длительного сопротивления колонн.

Получены зависимости отношения жесткости колонны при длительном и кратковременном действии внешней нагрузки от гибкости стержней, которая заложена в действующих нормативных документах, и являющаяся определяющим фактором при решении вопроса об учете длительного характера нагружения.

Сделанный вывод подтверждается данными вышеприведенных экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** железобетонные стойки, длительное нагружение, армирование, ползучесть, эксцентриситет, прогибы, гибкость, безопасность.

A.G. TAMRAZYAN<sup>1</sup>

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

## TO THE SAFE VALUE OF LONG-TERM LOADING OF COMPRESSED REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

*Abstract.* In the practice of calculations of compressed reinforced concrete elements for static effects, a number of questions important for determining the deformations and bearing capacity of these elements still do not have definitive and unambiguous answers. First of all, this is the problem of reliable accounting for the long-term effect of the external load. Unlike bending elements, the bearing capacity of compressed rods depends on the time they are under load.

The article deals with the influence of flexibility, the coefficient of reinforcement under long-term load on the decrease in the bearing capacity of a reinforced concrete compressed rod.

A calculation method is proposed to determine the long-term compressive force that provides a given period of safe operation of reinforced concrete columns.

The dependence of the ratio of the level of long-term action to the short-term breaking load on the deflections of compressed rods is revealed.

*An analysis of experimental studies was carried out, indicating that the value of this ratio depends on the eccentricity of the longitudinal force, as well as data on the magnitude of the reduction in the long-term resistance of the columns.*

*Dependences of the stiffness ratio of the column under long-term and short-term external load on the flexibility of the rods, which is laid down in the current regulatory documents, and which is the determining factor in deciding whether to take into account the long-term nature of loading, are obtained.*

*This conclusion is confirmed by the data of the above experimental studies.*

**Keywords:** reinforced concrete racks, long-term loading, reinforcement, creep, eccentricity, deflections, flexibility, safety.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 (с Изменениями №1, 2, 3)» . -введ. с 2018-12-19. - М.: Минстрой России, 2018.
2. Тамразян А.Г., Фаликман В.Р. Основные требования к проектированию железобетонных конструкций по модельному кодексу ФИБ // Строительство и реконструкция. 2016. № 3(65). С. 71-77.
3. Тамразян А.Г., Есаян С.Г. Механика ползучести бетона. Монография / Москва, 2012. Сер. Библиотека научных разработок и проектов МГСУ. 2012. 524 с.
4. Тамразян А.Г. К расчету железобетонных элементов с учетом ползучести и старения на основе реологической модели бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 7. С. 26-27.
5. Тамразян А.Г. К устойчивости внецентренно сжатых железобетонных элементов с малым эксцентриситетом с учетом реологических свойств бетона // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 2. № 2. С. 48–57.
6. Расчетный анализ длительного деформирования основания комплекса зданий курской АЭС. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Дмитриева К.О., Дьяков И.М. В книге: Методология безопасности среды жизнедеятельности. Программа и тезисы IV Крымской Международной научно-практической конференции. Под редакцией: А.Т. Дворецкого, Т.В. Денисовой, А.Е. Максименко. 2017. С. 44-45.
7. Крылов С.Б., Гончаров Е.Е. Использование реологических моделей при моделировании ползучести бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 32-33.
8. Харлаб В.Д. Принципиальные вопросы линейной теории ползучести (с привязкой к бетону). СПб.: СПбГАСУ, 2014. 207 с.
9. Галустов К.З. Нелинейная теория ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций / К. З. Галустов. - М.: Физматлит, 2006. - 248 с.
10. Крылов С.Б. Особенности применения уравнений теории ползучести к расчету стержневых изогнутых и сжато-изогнутых железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское стр-во. 2004. № 4. С. 32-33.
11. Селяев В.П., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Алимов М.Ф. Аналитическое описание диаграмм деформирования бетона для расчета прогибов пластин из нелинейно деформируемого материала // Строительство и реконструкция. 2018. № 3 (77). С. 22-29.
12. Zainab Kammouna, Matthieu Briffaut, Yann Malecot. Experimental Study of the Creep Effect on the Mechanical Properties of Concrete. *Advances in Civil Engineering*. 2019:1-9
13. Ruiz M.F., Muttoni A., Gambarova P.G. Relationship between nonlinear creep and cracking of concrete under uniaxial compression. *J. Adv. Concr. Technol.*, 5(3), (2007), pp. 383-393.
14. EN 1992 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2001, p. 225.
15. Zuanfeng Pan, Dong Cao, Bin Zeng, Yuwei Wang. Nonlinear Creep Amplification Factor Considering Damage Evolution of Concrete under Compression. *Materials* 2022, 15(19), 6742.
16. Mazzotti C.; Savoia M. Nonlinear creep damage model for concrete under uniaxial compression. *J. Eng. Mech.* 2003, 129, 1065–1075.
17. Neville A.M., Dilger W.H., Brooks J.J., Creep of plain and structural concrete, Construction Press, London and NewYork (1983).
18. Bazant Z.P., Xi Y., Baweja S. Improved prediction model for time dependent deformations of concrete: Part 7—Short form of BPKX model, Statistics and extrapolation of short-time data,” *Materials and Structures* 26 (1993), 567–574.
19. Таль К.Э., Чистяков Е.А. Экспериментальные исследования несущей способности гибких железобетонных стержней при длительном нагружении. В кн. Исследование прочности, жесткости и трещиностойкости конструкций.- М.: Гостройиздат, 1962. Дып. 26. С.30-58.

REFERENCES

1. SP 63.13330.2018 «Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruksii. Osnovnyye polozheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 52-01-2003 (s Izmeneniyami №1, 2, 3)» . -vved. s 2018-12-19. - M.: Minstroy Rossii, 2018.
2. Tamrazyan A.G., Falikman V.R. Osnovnyye trebovaniya k proyektirovaniyu zhelezobetonnykh konstruksiy po model'nomu kodeksu FIB. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2016. No. 3 (65). Pp. 71-77.
3. Tamrazyan A.G., Yesayan S.G. Mekhanika polzuchesti betona. Monografiya / Moskva, 2012. Ser. Biblioteka nauchnykh razrabotok i projektov MGSU. 2012.524 p.
4. Tamrazyan A.G. K raschetu zhelezobetonnykh elementov s uchetom polzuchesti i stareniya na osnove reologicheskoy modeli betona. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2012. No. 7. Pp. 26-27.
5. Tamrazyan A.G. K ustoychivosti vnetsentrenno szhatykh zhelezobetonnykh elementov s malym ekstsentrisitetom s uchetom reologicheskikh svoystv betona // Zhelezobetonnyye konstruksii. 2023. T. 2. No. 2. Pp. 48–57.
6. Raschetnyy analiz dlitel'nogo deformirovaniya osnovaniya kompleksa zdaniy kurskoy AES. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Dmitriyeva K.O., D'yakov I.M. V knige: Metodologiya bezopasnosti sredey zhiznedeyatel'nosti. Programma i tezisy IV Krymskoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Pod redaktsiyey: A.T. Dvoret'skogo, T.V. Denisovoy, A.Ye. Maksimenko. 2017. Pp. 44-45.
7. Krylov S.B., Goncharov Ye.Ye. Ispol'zovaniye reologicheskikh modeley pri modelirovanii polzuchesti betona. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo. 2013. No. 2. Pp. 32-33.
8. Kharlab V.D. Printsipial'nyye voprosy lineynoy teorii polzuchesti (s privyazkoy k betonu). SPb.: SPbGASU, 2014. 207 p.
9. Galustov K.3. Nelineynaya teoriya polzuchesti betona i raschet zhelezobetonnykh konstruksiy. M.: Fizmatlit, 2006. 248 p.
10. Krylov S.B. Osobennosti primeneniya uravneniy teorii polzuchesti k raschetu sterzhnykh izognutykh i szhato-izognutykh zhelezobetonnykh konstruksiy // Promyshlennoye i grazhdanskoye str-vo. 2004. No. 4. Pp. 32-33.
11. Selyayev V.P., Selyayev P.V., Sorokin Ye.V., Alimov M.F. Analiticheskoye opisaniye diagramm deformirovaniya betona dlya rascheta progibov plastin iz nelineyno deformiruyemogo materiala // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2018. No. 3 (77). Pp. 22-29.
12. Zainab Kammouna, Matthieu Briffaut, Yann Malecot. Experimental Study of the Creep Effect on the Mechanical Properties of Concrete. Advances in Civil Engineering 2019:1-9
13. Ruiz M.F., Muttoni A., Gambarova P.G. Relationship between nonlinear creep and cracking of concrete under uniaxial compression. J. Adv. Concr. Technol., 5 (3) (2007), pp. 383-393.
14. EN 1992 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. Brussels: European Committee for Standardization, 2001, p. 225.
15. Zuanfeng Pan, Dong Cao, Bin Zeng, Yuwei Wang. Nonlinear Creep Amplification Factor Considering Damage Evolution of Concrete under Compression. Materials 2022, 15(19), 6742.
16. Mazzotti, C.; Savoia, M. Nonlinear creep damage model for concrete under uniaxial compression. J. Eng. Mech. 2003, 129, 1065–1075.
17. Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J., Creep of plain and structural concrete, Construction Press, London and NewYork (1983).
18. Bazant, Z.P., Xi, Y., and Baweja, S., "Improved prediction model for time dependent deformations of concrete: Part 7—Short form of BPKX model, Statistics and extrapolation of short-time data," Materials and Structures 26 (1993), 567–574.
19. Tal' K.E., Chistyakov Ye.A. Eksperimental'nyye issledovaniya nesushchey sposobnosti gibkikh zhelezobetonnykh sterzhney pri dlitel'nom nagruzhenii. V kn. Issledovaniye prochnosti, zhestkosti i treshchinostoykosti konstruksiy. M.: Gosstroyizdat, 1962. Vyp.26. Pp. 30-58.

**Информация об авторе:**

**Тамразян Ашот Георгиевич**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, доктор технических наук, профессор, чл.-корр. РААСН, зав. кафедрой Железобетонных и каменных конструкций.

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

**Information about author:**

**Tamrazyan Ashot G.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia, doctor of technical sciences, professor, Corresponding Member RAACS, head Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.

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

Н.В. ФЕДОРОВА<sup>1</sup>, В.И. КОЛЧУНОВ<sup>2</sup>, О.Б. БУШОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ РАМ ПРИ РАЗРУШЕНИИ РИГЕЛЕЙ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ

*Аннотация.* На энергетической основе, решена задача расчета нелинейного деформирования конструкций железобетонных многоэтажных рам при разрушении ригелей по наклонному сечению от особых воздействий, вызванных структурной перестройкой конструктивной системы. Получены аналитические зависимости для определения параметров диаграммы «момент-кривизна» и «поперечная сила-сдвиг» при статико-динамическом режиме нагружения рассматриваемых конструкций. Определена предельная нагрузка, при которой в рассматриваемой конструктивной системе рамы после приложения особого воздействия в виде внезапного удаления одной из колонн достигается особое предельное состояние с разрушением ригелей по наклонным сечениям. Полученная расчетная схема разрушения ригелей рассматриваемых конструкций рам вызванных совместным действием изгибающих моментов и поперечных сил, сопоставлена со схемой разрушения, полученной экспериментально.

**Ключевые слова:** железобетон, энергетический метод, поперечная сила, наклонное сечение, деформирование, особое воздействие.

N.V. FEDOROVA<sup>1</sup>, V.I. KOLCHUNOV<sup>2</sup>, O.B. BUSHOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Construction Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia

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

## CALCULATION OF PARAMETERS OF DEFORMATION OF REINFORCED CONCRETE FRAMES DURING THE DESTRUCTION OF CROSSBARS ALONG AN INCLINED SECTION

*Abstract.* On an energy basis, the problem of calculating the nonlinear deformation of structures of reinforced concrete multi-storey frames during the destruction of crossbars along an inclined section from special influences caused by structural restructuring of the structural system is solved. Analytical dependences are obtained for determining the parameters of the "moment-curvature" and "transverse force-shear" diagrams in the static-dynamic loading mode of the structures under consideration. The limiting load is determined at which, in the considered structural system of the ring, after applying a special effect in the form of a sudden removal of one of the columns, a special limiting state is achieved with the destruction of crossbars along inclined sections. The obtained design scheme of the destruction of the crossbars of the frame structures under consideration caused by the combined action of bending moments and transverse forces is compared with the destruction scheme obtained experimentally.

**Keywords:** reinforced concrete, energy method, transverse force, inclined section, deformation, special impact.

© Федорова Н.В., Колчунов В.И., Бушова О.Б., 2023

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алмазов В.О., Као Зуй Кхой. Динамика прогрессирующего разрушения монолитных многоэтажных каркасов. М.: АСВ, 2013. 128 с.
  2. Еремеев П.Г. Методы проектирования на прогрессирующее обрушение: гармонизация российских и международных нормативных документов // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 4. С. 23-28.
- № 2 (106) 2023

3. Федорова Н.В., Фан Динь Гуок, Нгуен Тхи Чанг. Экспериментальные исследования живучести железобетонных рам с ригелями, усиленными косвенным армированием // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 1. С. 92-100.
4. Ильющенко Т.А., Колчунов В.И., Федоров С.С. Трещиностойкость преднапряженных железобетонных рамно-стержневых конструкций при особых воздействиях // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 1. С. 74-84.
5. Ву Нгок Туен. Исследование живучести железобетонной конструктивно нелинейной рамно-стержневой системы каркаса многоэтажного здания в динамической постановке // *Строительство и реконструкция*. 2020. Т. 90. № 4. С.73–84.
6. Федорова Н.В., Халина Т.А. Исследование динамических догрузений в железобетонных конструктивных системах при внезапных структурных перестройках // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 8. С. 32-36.
7. Alogla K., Weekes L., Augusthus-Nelson L. A new mitigation scheme to resist progressive collapse of RC structures // *Construction and Building Materials*. 2016. (125). С. 533–545.
8. Alshaiikh I. M. H. [и др.]. Progressive collapse of reinforced rubberised concrete: Experimental study // *Construction and Building Materials*. 2019. (226). С. 307–316.
9. Li J., Hao H. Numerical study of structural progressive collapse using substructure technique // *Engineering Structures*. 2013. (52). С. 101–113.
10. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario // *Shock and Vibration*. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. doi:10.1155/2019/2354931
11. Lin K., Lu X., Li Y., Guan H. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. Vol. 119. Pp.390–407
12. Колчунов В.И., Бушова О.Б., Кореньков П.А. Деформирование и разрушение железобетонных рам с ригелями, армированными наклонными стержнями, при особых воздействиях // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 1. С. 18–28.
13. Колчунов В.И., Бушова О.Б. Деформирование железобетонных каркасов многоэтажных зданий в запредельных состояниях при особых воздействиях// *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2022. Т. 18. № 4. С. 297-306.
14. Колчунов В.И., Федорова Н.В., Савин С.Ю. Динамические эффекты в статически неопределимых физически и конструктивно нелинейных системах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 9. С. 42-51.
15. Колчунов В.И., Ключева Н.В., Андросова Н.Б., Бухтиярова А.С. Живучесть зданий и сооружений при запроектных воздействиях/ *Научное издание*. – М.: АСВ, 2014. 208 с.
16. Федорова Н.В., Московцева В.С., Амелина М.А., Демьянов А.И. Определение Динамических усилий в сложнапряженных элементах железобетонных рам при особом воздействии // *Известия вузов. Строительство*. 2023. № 2. С. 6-15.
17. Гениев Г.А., Колчунов В.И., Ключева Н.В. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях - М.: АСВ, 2004. 216 с.
18. Savin A.Yu., Kolchunov V.I. Dynamic behavior of reinforced concrete column under accidental impact// *International journal for computational civil and structural engineering*. 2021. С. 120-131.
19. Верюжский Ю.В., Колчунов В.И., Барабаш М.С., Гензерский Ю.В. Компьютерные технологии проектирования железобетонных конструкций – К.: Книжное изд-во НАУ, 2006. 808 с.
20. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона – М.: АСВ, 2004. 472 с.

## REFERENCES

1. Almazov V.O., Kao Zui Khoi. Dynamics of progressive destruction of monolithic multi-storey frames. M.: DIA, 2013. 128 p.
2. Eremeev P.G. Design methods for progressive collapse: harmonization of Russian and international regulatory documents // *Industrial and civil construction*. 2022. No. 4. Pp. 23-28.
3. Fedorova N.V., Fan Dinh Guok, Nguyen Thi Chang. Experimental studies of the survivability of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with indirect reinforcement // *Construction and reconstruction*. 2020. No. 1. Pp. 92-100.
4. Pyushenko T.A., Kolchunov V.I., Fedorov S.S. Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame-rod structures under special influences. *Construction and reconstruction*. 2021. No. 1. Pp.74-84.
5. Wu Ngoc Tuen. Study of the survivability of a structurally nonlinear reinforced concrete frame-rod frame system of a multi-storey building in a dynamic formulation // *Construction and reconstruction*. 2020. Vol. 90. No. 4. Pp. 73-84.
6. Fedorova N.V., Khalina T.A. Investigation of dynamic overloads in reinforced concrete structural systems during sudden structural rearrangements // *Industrial and civil construction*. 2017. No. 8. Pp. 32-36.
7. Alogla K., Weekes L., Augusthus-Nelson L. A new mitigation scheme to resist progressive collapse of RC structures // *Construction and Building Materials*. 2016. (125). Pp. 533–545.

8. Alshaikh I. M. H. [et al.]. Progressive collapse of reinforced rubberized concrete: Experimental study // *Construction and Building Materials*. 2019. (226). Pp. 307-316.
9. Li J., Hao H. Numerical study of structural progressive collapse using substructure technique // *Engineering Structures*. 2013. (52). Pp. 101–113.
10. Xuan W., Wang L., Liu C., Xing G., Zhang L., Chen H. Experimental and theoretical investigations on progressive collapse resistance of the concrete-filled square steel tubular column and steel beam frame under the middle column failure scenario // *Shock and Vibration*. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–12. doi:10.1155/2019/2354931
11. Lin K., Lu X., Li Y., Guan H. Experimental study of a novel multi-hazard resistant prefabricated concrete frame structure // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019. Vol.119. Pp. 390-407.
12. Kolchunov V.I., Bushova O.B., Korenkov P.A. Deformation and destruction of reinforced concrete frames with crossbars reinforced with inclined rods, under special influences // *Construction and reconstruction*. 2022. No. 1. Pp. 18-28.
13. Kolchunov V.I., Bushova O.B. Deformation of reinforced concrete frames of multi-storey buildings in extreme conditions under special influences // *Construction Mechanics of engineering structures and structures*. 2022. Vol. 18. No. 4. Pp. 297-306.
14. Kolchunov V.I., Fedorova N.V., Savin S.Yu. Dynamic effects in statically indeterminate physically and structurally nonlinear systems // *Industrial and civil construction*. 2022. No. 9. Pp. 42-51.
15. Kolchunov V.I., Klyueva N.V., Androsova N.B., Bukhtiyarova A.S. Survivability of buildings and structures under non-design impacts/ *Scientific edition*. – M.: DIA, 2014. 208 p.
16. Fedorova N.V., Moskovtseva V.S., Amelina M.A., Demyanov A.I. Determination of dynamic forces in complex-stressed elements of reinforced concrete frames under special impact // *Izvestiya vuzov. Construction*. 2023. No.2. From 6-15.
17. Geniev G.A., Kolchunov V.I., Klyueva N.V. Strength and deformability of reinforced concrete structures under beyond design impacts - M.: DIA, 2004. 216 p.
18. Savin A.Yu., Kolchunov V.I. Dynamic behavior of reinforced concrete column under accidental impact// *international journal for computational civil and structural engineering*. 2021. Pp. 120-131.
19. Veryuzhsky Yu.V., Kolchunov V.I., Barabash M.S., Genzersky Yu.V. Computer technologies for designing reinforced concrete structures – K.: NAU Book Publishing House, 2006. 808 p.
20. Bondarenko V.M., Kolchunov V.I. Computational models of the strength resistance of reinforced concrete – M.: DIA, 2004. 472 p.

#### **Информация об авторах:**

**Федорова Наталия Витальевна**

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН Российская Федерация, г. Москва, Россия, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИИСФ РААСН.  
E-mail: [fenavit@mail.ru](mailto:fenavit@mail.ru)

**Колчунов Виталий Иванович**

ФГБОУ ВО " Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций.  
E-mail: [asiorel@mail.ru](mailto:asiorel@mail.ru)

**Бушова Олеся Борисовна**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ.  
E-mail: [bushova96@mail.ru](mailto:bushova96@mail.ru)

#### **Information about authors:**

**Fedorova Natalia V.**

Scientific Research Institute of Construction Physics of the RAASN Russian Federation, Moscow, Russia, doctor of technical sciences, professor, leading researcher of the NIISF RAASN.  
E-mail: [fenavit@mail.ru](mailto:fenavit@mail.ru)

**Kolchunov Vitaly Iv.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, Russia, doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures.  
E-mail: [asiorel@mail.ru](mailto:asiorel@mail.ru)

**Bushova Olesya B.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, Russia, postgraduate student of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures of the MGSU.  
E-mail: [bushova96@mail.ru](mailto:bushova96@mail.ru)

Ш.В. БУЗИКОВ<sup>1</sup>, М.В. МОТОВИЛОВА<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Россия

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ С АСФАЛЬТОВЫМ ГРАНУЛЯТОМ

*Аннотация.* Состояние асфальтобетона и его нормативный срок эксплуатации на дорогах общего пользования являются основными показателями дорожного покрытия. Рассмотрены факторы нарушения верхнего слоя асфальтобетона от повышенных динамических воздействий колесной нагрузки транспортных средств. Эксплуатационные показатели характеризуются прочностными и деформационными характеристиками.

Проанализированы и обоснованы факторы обеспечивающие необходимые деформационные и прочностные параметры при эксплуатации дорожного полотна. Определены показатели и условия контакта поверхности измельченного гранулята в зоне соприкосновения с вяжущими компонентами.

Предложен способ использования асфальтового гранулята трех типоразмеров при формировании верхнего слоя дорожного покрытия с нормативным, эксплуатационным сроком службы и рациональным использованием материально-технических ресурсов на всех стадиях формирования и укладки асфальтобетона. Прочность дисперсной системы достигается при формировании асфальтовой смеси за счет повышения плотности, прочности, адгезии вяжущего, водостойкости и сохранения структуры дорожного покрытия. Экспериментом установлен объемный и фракционный типоразмер асфальтового гранулята в общем объеме смеси. Объемный состав содержания гранулята в общем объеме смеси составляет от 20% до 25%.

**Ключевые слова:** асфальтобетон и дорожное покрытие, показатели прочности и деформации, асфальтовый гранулят, плотность, старение.

Sh.V. BUZIKOV<sup>1</sup>, M.V. MOTOVILOVA<sup>1</sup><sup>1</sup>Vyatka State University, Kirov, Russia

## IMPROVING THE PERFORMANCE OF ROAD SURFACES WITH ASPHALT GRANULATE

*Abstract.* The condition of asphalt concrete and its standard service life on public roads are the main indicators of the road surface. The factors of violation of the top layer of asphalt concrete from increased dynamic effects of the wheel load of vehicles are considered. Performance indicators are characterized by strength and deformation characteristics.

The factors providing the necessary deformation and strength parameters during the operation of the roadway are analyzed and justified. The indicators and conditions of contact of the surface of the crushed granulate in the zone of contact with the binding components are determined.

A method of using asphalt granulate of three standard sizes in the formation of the top layer of pavement with a normative, operational service life and rational use of material and technical resources at all stages of the formation and laying of asphalt concrete is proposed. The strength of the dispersed system is achieved during the formation of an asphalt mixture by increasing the density, strength, adhesion of the binder, water resistance and preservation of the structure of the pavement. The experiment established the volumetric and fractional standard size of asphalt granulate in the total volume of the mixture. The volume composition of the granulate content in the total volume of the mixture is from 20% to 25%.

**Keywords:** asphalt concrete and road surface, strength and deformation indicators, asphalt granulate, density, aging.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуторов К.В., Павлова В.А. Универсальные добавки, улучшающие характеристики асфальтобетонных смесей // student. 2021. Т. 4. №. 4.
2. Zifeng Z., Feipeng X., Serji A. Recent applications of waste solid materials in pavement engineering // Waste Management. 2020. Vol. 108. Pp. 78-105. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.024>.
3. Jin Li, Feipeng X., Lanfang Z., Serji N. Amirkhanian Life cycle assessment and life cycle cost an alysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 233. Pp. 1182-1206. doi.org/10.1016/j.jclepro. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>.
4. Joke A., Wim Van den bergh, Johan B. Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements // Environmental Impact Assessment Review. 2016. Vol. 60. Pp. 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.eiar>.
5. Juliana O. Costa, Paulo H.R. Borges, Flávio A. dos Santos, Augusto Cesar S. Bezerra, Wim Van den bergh, Johan Blom. Cementitious binders and reclaimed asphalt aggregates for sustainable pavement base layers: Potential, challenges and research needs // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 265. Article 120325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>.
6. Abbaas I. Kareem, Performance of hot-mix asphalt produced with double coated recycled concrete aggregates // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 205. Pp. 425-433. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.023>.
7. Mills-Beale, J. The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates // Constr. Build. Mater. 2010. No. 24(3). Pp. 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.046>.
8. Farina A., Zanetti M.C., Santagata E., Blengini G.A. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement // Resources, Conservation and Recycling. 2017. No.117. Pp. 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015>.
9. Углова Е.В, Бессчетнов Б.В. Влияние погодно-климатических факторов на усталостную долговечность асфальтобетона //Известия высших учебных заведений. Строительство. 2009. № 7. С. 70–76.
10. Qasrawi H., Asi I Effect of bitumen grade on hot asphalt mixes properties prepared using recycled coarse concrete aggregate // Constr. Build. Mater. 2016. No. 121. Pp. 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.101>.
11. Лупанов А.П., Басков А.Н. Переработка старого асфальтобетона с применением технологии электромагнитного измельчения // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2008. Т. 51. Вып. 2. С. 108-110.
12. Лупанов А. П., Силкин В.В., Рудакова В.В., Гладышев Н.В., Силкин А.В. и др. Повторное использование асфальтобетона // СТТ: Строительная техника и технологии. 2016. Т. 4. №. 4. С. 76– 79.
13. Бадоев В. А., Лупанов А. П., Таршис М. Ю. Новый подход к использованию старого асфальтобетона в дорожном строительстве // Научные итоги года: достижения, проекты, гипотезы. 2011. №. 1-1. С. 277–281.
14. Hisham Q., Ibrahim A. Effect of bitumen grade on hot asphalt mixes properties prepared using recycled coarse concrete aggregate // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 121. Pp. 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.101>
15. Khodair Y., Raza M. Sustainable self-consolidating concrete using recycled asphalt pavement and high volume of supplementary cementitious materials // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 131. Pp. 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.044>.
16. Marshall V., Raman J., Ramasamy V. Various treatment techniques involved to enhance the recycled coarse aggregate in concrete: A review // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. Part 7. Pp. 6356-6363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.935>.
17. Pasandín A.R., Pérez I. Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 55. Pp. 350-358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.053>.
18. Chidozie Maduabuchukwu Nwakaire, Soon Poh Yap, Chiu Chuen Onn, Choon Wah Yuen, Hussein Adebayo Ibrahim Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 235. Article 117444. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117444>.
19. Huang B., Shu X., Li G. Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35. Pp. 2008-2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.05.002>.
20. Pérez P., Agrela F., Herrador R., Ordoñez J. Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 44. Pp. 593-599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.034>.



REFERENCES

1. Gutorov K.V., Pavlova V.A. Universal'nye dobavki, uluchshayushchie harakteristiki asfal'tobetonnyh smesej. StudNet, 2021. T. 4. No. 4.
2. Zifeng Z., Feipeng X., Serji A. Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. Waste Management. 2020. Vol. 108. Pp. 78-105. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.024>.
3. Jin Li, Feipeng X., Lanfang Z., Serji N. Amirkhanian Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 233. Pp. 1182-1206. [doi.org/10.1016/j.jclepro](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>.
4. Joke A., Wim Van den bergh, Johan B. Review and environmental impact assessment of green technologies for base courses in bituminous pavements. Environmental Impact Assessment Review, 2016. Vol. 60. Pp. 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.eiar>.
5. Juliana O. Costa, Paulo H.R. Borges, Flávio A. dos Santos, Augusto Cesar S. Bezerra, Wim Van den bergh, Johan Blom. Cementitious binders and reclaimed asphalt aggregates for sustainable pavement base layers: Potential, challenges and research needs. Construction and Building Materials. 2020. Vol. 265. Article 120325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>.
6. Abbaas I. Kareem, Performance of hot-mix asphalt produced with double coated recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials. 2019 Vol. 205. Pp. 425-433. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.023>.
7. Mills-Beale, J. The mechanical properties of asphalt mixtures with Recycled Concrete Aggregates // Constr. Build. Mater. 2010. No. 24(3). Pp. 230–235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.046>.
8. Farina A., Zanetti M.C., Santagata E., Blengini G.A. Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement // Resources, Conservation and Recycling. 2017. No. 117. Pp. 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015>.
9. Uglova E.V., Besschetnov B.V. Vliyanie pogodno-klimaticheskikh faktorov na ustalostnuyu dolgovechnost' asfal'tobetona // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2009. No. 7. Pp. 70–76.
10. Qasrawi H., Asi I Effect of bitumen grade on hot asphalt mixes properties prepared using recycled coarse concrete aggregate // Constr. Build. Mater. 2016. No. 121. Pp. 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.101>.
11. Lupanov A.P., Baskov A.N. Pererabotka starogo asfal'tobetona s primeneniem tekhnologii elektromagnitnogo izmel'cheniya // Izv. vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2008. T. 51. Vyp. 2. Pp. 108-110.
12. Lupanov A. P., Silkin V.V., Rudakova V.V., Gladyshev N.V., Silkin A.V. i dr. Povtornoie ispol'zovanie asfal'tobetona // STT: Stroitel'naya tekhnika i tekhnologii. 2016. T. 4. No. 4. Pp. 76–79.
13. Badoev V. A., Lupanov A. P., Tarshis M. YU. Novyj podhod k ispol'zovaniyu starogo asfal'tobetona v dorozhnom stroitel'stve // Nauchnye itogi goda: dostizheniya, proekty, gipotezy. 2011. No. 1-1. Pp. 277–281.
14. Hisham Q., Ibrahim A. Effect of bitumen grade on hot asphalt mixes properties prepared using recycled coarse concrete aggregate // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 121, Pp. 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.101>
15. Yasser Khodair, Mahmood Raza Sustainable self-consolidating concrete using recycled asphalt pavement and high volume of supplementary cementitious materials. // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 131. Pp. 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.044>.
16. Vengadesh Marshall Raman J., Ramasamy V. Various treatment techniques involved to enhance the recycled coarse aggregate in concrete: A review // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 45. Part 7. Pp. 6356-6363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.935>.
17. Pasandín A.R., Pérez I. Mechanical properties of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates coated with bitumen emulsion. // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 55. Pp. 350-358. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.053>.
18. Chidozie Maduabuchukwu Nwakaire, Soon Poh Yap, Chiu Chuen Onn, Choon Wah Yuen, Hussein Adebayo Ibrahim Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review. // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 235. Article 117444. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117444>.
19. Baoshan Huang, Xiang Shu, Guoqiang Li Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements // Cement and Concrete Research, 2005. Vol. 35. Pp. 2008-2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.05.002>.
20. Pérez P., Agrela F., Herrador R., Ordoñez J. Application of cement-treated recycled materials in the construction of a section of road in Malaga, Spain. // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 44. Pp. 593-599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.034>.

### Информация об авторах:

**Бузиков Шамиль Викторович**

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Россия,  
кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства.  
E-mail: [shamilvb@mail.ru](mailto:shamilvb@mail.ru)

**Мотовилова Марина Владимировна**

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Россия,  
заведующий лабораторией кафедры технология машиностроения.  
E-mail: [marina\\_mtd@mail.ru](mailto:marina_mtd@mail.ru)

### Information about authors:

**Buzikov Shamil V.**

Vyatka State University, Kirov, Russia,  
candidate of technical sciences, associate professor of the department of construction production.  
E-mail: [shamilvb@mail.ru](mailto:shamilvb@mail.ru)

**Motovilova Marina V.**

Vyatka State University, Kirov, Russia  
head of the laboratory of the department of mechanical engineering technology.  
E-mail: [marina\\_mtd@mail.ru](mailto:marina_mtd@mail.ru)

Л.Ф. КАЗАНСКАЯ<sup>1</sup>, О.М. СМІРНОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, Россия

## ДЕСТРУКЦИЯ БЕТОНА НА ОСНОВЕ СУЛЬФАТНО-ШЛАКОВЫХ ВЯЖУЩИХ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

*Аннотация.* Железобетонные конструкции пола животноводческих комплексов в процессе эксплуатации подвергаются интенсивным воздействиям. В основном в конструкциях пола используются бетоны на портландцементе. Была проведена сравнительная оценка влияния органической среды на прочностные и деформационные свойства бетона на основе портландцемента, шлакопортландцемента и сульфатно-шлаковых вяжущих с различными активаторами твердения. Установлено, что составы на основе комплексно-активированных сульфатно-шлаковых вяжущих обладают наилучшей стойкостью в агрессивной органической среде животноводческих помещений по сравнению с образцами бетона на основе портландцемента и шлакопортландцемента.

*Ключевые слова:* сульфатно-шлаковые вяжущие, бесклинкерные вяжущие, деструкция бетона в органической среде, бетонная стяжка пола, животноводческий комплекс, агрессивная среда.

L.F. KAZANSKAYA<sup>1</sup>, O.M. SMIRNOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

## DESTRUCTION OF CONCRETE BASED ON SULFATE-SLAG BINDERS IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS OF LIVESTOCK COMPLEXES

*Abstract.* Reinforced concrete floor structures of livestock complexes are subjected to intense impacts during operation. Concretes based on Portland cement are mainly used in floor structures. A comparative assessment of the influence of the organic medium on the strength and deformation properties of concrete based on Portland cement, slag-Portland cement and sulfate-slag binders with various hardening activators was carried out. It has been stated that compositions based on complex-activated sulfate-slag binders have the best resistance in the aggressive organic environment of livestock premises compared with concrete samples based on Portland cement and slag-Portland cement.

*Keywords:* sulfate-slag binders, clinker-free binders, destruction of concrete in an organic environment, concrete floor screed, livestock complex, aggressive environment.

© Казанская Л.Ф., Смирнова О.М., 2023

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Коновалова В.С., Караваев И.В. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из бетона, содержащего гидрофобизирующие добавки // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2017. № 6 (372). С. 268-276.
2. Федосов С.В., Нармания Б.Е. Кинетика коррозионного массопереноса в цементных бетонах в условиях воздействия грибковых микроорганизмов. В сборнике: Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт. Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е.М.. 2022. С. 197-201.

3. Строкин К.Б., Новиков Д.Г., Коновалова В.С., Логинова С.А., Нармания Б.Е. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из железобетона в условиях микробиологической коррозии // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2020. № 4 (37). С. 62-69.
4. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Морозов Е.А. Микроорганизмы разрушители материалов и изделий // *Изв. вузов. Строительство*. 2001. № 8. С. 4 – 12.
5. Строганов В.Ф., Куколева Д.А., Бараева Л.Р. Метод испытания минеральных строительных материалов на биостойкость в модельных агрессивных средах // *Вестник Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2011. № 3. С. 153 – 161.
6. Чеснокова Т.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Изучение грибковой коррозии бетона с помощью модельной среды // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2019. № 3 (59). С. 85-89.
7. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 12. Ч. 4. С. 708–716.
8. Румянцева В.Е., Гоглев И.Н., Логинова С.А. Применение полевых и лабораторных методов определения карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений // *Строительство и техногенная безопасность*. 2019. № 15 (67). С. 51–58.
9. Селяев В.П., Неверов В.А., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Юдина О.А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 1. С. 41–52.
10. Семенов С.А., Гумаргалиева К.З., Калинина И.Г., Заиков Г.Е. Биоразрушения материалов и изделий техники // *Вестник МИТХТ*. 2007. Т. 2. № 6. С. 3–26.
11. Степанова В. Ф. Долговечность бетона. Москва: Ассоциация строительных вузов, 2014. 126 с.
12. Румянцева В.Е., Логинова С.А., Карцева Н.Е. Математическое моделирование коррозии бетонных конструкций в биологически агрессивных средах // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2021. № 3 (102). С. 56-67.
13. Ерофеев В.Т., Аль Д.С.Д.С., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Биологическая коррозия бетонов // *Строительные материалы*. 2020. № 11. С. 13-23.
14. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А., Гоглев И.Н. Исследование стойкости цементного камня к биокоррозии. В сборнике: *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году. Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук*. Москва, 2020. С. 472-476.
15. Строкин К.Б., Новиков Д.Г., Коновалова В.С., Касьяненко Н.С. Влияние микроорганизмов на физико-механические свойства бетона // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2021. № 10. С. 90-98.
16. Рахимбаев Ш.М., Тольпина Н.М. Обоснование выбора типа вяжущего для агрессивных сред органического происхождения на основе теории гетерогенных физико-химических процессов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2016. Т. 1. № 9. С. 159-163.
17. Рахимбаев Ш.М., Тольпина Н.М. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем рационального выбора вяжущего и заполнителей // *Монография. Белгород, Изд-во БГТУ, 2015. 321 с.*
18. Рахимбаев Ш.М., Карпачева Е.Н, Тольпина Н.М.О выборе типа цемента на основе теории кольматации при сложном составе агрессивной среды // *Бетон и железобетон*. 2012. № 5. С. 25–26.
19. Брыков А.С. Сульфатная коррозия портландцементных бетонов // *Цемент и его применение*. 2014. № 6. С. 96–103.
20. Rakhimova N. R., Rakhimov R. Z. Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2019. 509, 31-41.
21. Петрова Т.М. Взаимосвязь структуры и долговечности шлакощелочных бетонов на основе доменных и сталеплавильных шлаков // *Вестник гражданских инженеров*. 2012. № 4 (33). С. 167-173.
22. Amran M., Fediuk R., Abdelgader H.S., Murali G., Ozbakkaloglu T., Lee Y.H., Lee Y.Y. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: a review // *Journal of Building Engineering*. 2022. Т. 45. С. 103638.
23. Yakovlev G., Polyanskikh I., Gordina A., Pudov I., Černý V., Gumenyuk A., Smirnova O. Influence of sulphate attack on properties of modified cement composites // *Applied Sciences*. 2021. 11(18), 8509.
24. Ерошкина Н.А., Чамурлиев М.Ю., Коровкин М.О. Серноокислотная коррозия геополлимерных бетонов с минеральными добавками на основе отходов // *Транспортные сооружения*. 2019. Т. 6. № 3. С. 25.
25. Гришина А.Н., Королев Е.В., Михеев А.В., Гладких В.А. Влажностные деформации бетона, подверженного щелочной коррозии. Экспериментальные результаты // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 6 (83). С. 140-148.

26. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Влияние содержания добавок термоактивированной глины на свойства и состав продуктов твердения композиционного шлакощелочного вяжущего с низким содержанием щелочного активатора // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 2 (56). С. 50-59.
27. Федюк Р.С. Свойства композиционных вяжущих на основе техногенных отходов Дальнего Востока // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 132-136.
28. Kazanskaya L.F., Smirnova O.M. Supersulphated Cements with Technogenic Raw Materials // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. 9(11). Pp. 3006–3012.
29. Смирнова О.М., Казанская Л.Ф. Гибридные цементы на основе гранулированных доменных шлаков: основные направления исследований // Эксперт: теория и практика. 2022. № 3 (18). С. 59-65.
30. Mehdizadeh H., Kani E.N., Sanchez A.P., Fernandez-Jimenez, A. (2018). Rheology of activated phosphorus slag with lime and alkaline salts // Cement and Concrete Research, 113, 121-129.
31. Полак А.Ф., Бабков В.В., Андреева Е.П. Твердение минеральных вяжущих веществ. Уфа: Башк. кн. изд-во, 1990. 216 с.
32. Казанская Л.Ф., Макаров Ю.И., Григорьев Д.С. Прочность и стойкость многокомпонентных минеральных вяжущих на основе техногенного сырья // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2014. № 1 (38). С. 75-81.
33. Казанская Л.Ф., Смирнова О.М. Вяжущие щелочной активации: стремление к альтернативе портландцементу // Цемент и его применение. 2015. № 2. С. 137-140

## REFERENCES

1. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Karavaev I.V. Determination of the resource of safe operation of concrete structures containing hydrophobic additives // Izvestiya vuzov. Technology of the textile industry. 2017. No. 6 (372). Pp. 268-276.
2. Fedosov S.V., Narmania B.E. Kinetics of corrosive mass transfer in cement concretes under the influence of fungal microorganisms. In the collection: Sustainable development of the region: architecture, construction and transport. Materials of the ixth International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences Chernyshov E.M. 2022. Pp. 197-201.
3. Strokin K.B., Novikov D.G., Konovalova V.S., Loginova S.A., Narmania B.E. Determination of the resource of safe operation of reinforced concrete structures in conditions of microbiological corrosion // Modern problems of civil protection. 2020. No. 4 (37). Pp. 62-69.
4. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Morozov E.A. Microorganisms destroyers of materials and products // Izv. vuzov. Construction. 2001. No. 8. Pp. 4-12.
5. Stroganov V.F., Kukoleva D.A., Baraeva L.R. Method of testing mineral building materials for biostability in model aggressive environments // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2011. No. 3. Pp. 153 – 161.
6. Chesnokova T.V., Rumyantseva V.E., Loginova S.A. The study of fungal corrosion of concrete with the help of a model medium // Modern science-intensive technologies. Regional application. 2019. No. 3 (59). Pp. 85-89.
7. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Biocorrosion of cement concrete, features of its development, evaluation and forecasting // Fundamental research. 2014. No. 12. Ch. 4. Pp. 708-716.
8. Rumyantseva V.E., Goglev I.N., Loginova S.A. Application of field and laboratory methods for determining carbonation, chloride and sulfate corrosion in the examination of building structures of buildings and structures // Construction and technogenic safety. 2019. No. 15 (67). Pp. 51-58.
9. Selyaev V.P., Neverov V.A., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Yudina O.A. Forecasting the durability of reinforced concrete structures taking into account sulfate corrosion of concrete // Civil Engineering magazine. 2014. No. 1. Pp. 41-52.
10. Semenov S.A., Gumargalieva K.Z., Kalinina I.G., Zaikov G.E. Biodegradation of materials and engineering products // Vestnik MITKHT. 2007. Vol. 2. No. 6. Pp. 3-26.
11. Stepanova V.F. Durability of concrete. Moscow: Association of Construction Universities, 2014. 126 p.
12. Rumyantseva V.E., Loginova S.A., Kartseva N.E. Mathematical modeling of corrosion of concrete structures in biologically aggressive environments // Bulletin of Cherepovets State University. 2021. No. 3 (102). Pp. 56-67.
13. Erofeev V.T., Al D.S.D.S., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Biological corrosion of concrete // Building Materials. 2020. No. 11. Pp. 13-23.
14. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Loginova S.A., Goglev I.N. Investigation of the resistance of cement stone to biocorrosion. In the collection: Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the

construction industry of the Russian Federation in 2019. Collection of scientific works of the RAASN. Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. Moscow, 2020. Pp. 472-476.

15. Strokin K.B., Novikov D.G., Konovalova V.S., Kasyanenko N.S. The effect of microorganisms on the physical and mechanical properties of concrete // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2021. No. 10. Pp. 90-98.

16. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M. Substantiation of the choice of the type of binder for aggressive media of organic origin based on the theory of heterogeneous physico-chemical processes // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2016. Vol. 1. No. 9. Pp. 159-163.

17. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M. Improving the corrosion resistance of concrete by rational choice of binder and fillers // Monograph. Belgorod, Publishing House of BSTU, 2015. 321 p.

18. Rakhimbayev Sh.M., Karpacheva E.N., Tolypina N.M. On the choice of the type of cement based on the theory of colmatation with a complex composition of an aggressive medium // Concrete and reinforced concrete. 2012. No. 5. Pp. 25-26.

19. Brykov A.S. Sulfate corrosion of Portland cement concretes // Cement and its application. 2014. No. 6. Pp. 96-103.

20. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials // Journal of Non-Crystalline Solids. 2019. 509, 31-41.

21. Petrova T.M. Interrelation of structure and durability of slag-alkaline concretes based on blast furnace and steelmaking slags // Bulletin of Civil Engineers. 2012. No. 4 (33). Pp. 167-173.

22. Amran M., Fediuk R., Abdelgader H.S., Murali G., Ozbakkaloglu T., Lee Y.H., Lee Y.Y. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: a review // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. Pp. 103638.

23. Yakovlev G., Polyanskikh, I., Gordina A., Pudov I., Černý V., Gumenyuk A., Smirnova O. Influence of sulfate attack on properties of modified cement composites // Applied Sciences. 2021. 11(18), 8509.

24. Eroshkina N.A., Chamurliov M.Yu., Korovkin M.O. Sulfuric acid corrosion of geopolymer concrete with mineral additives based on waste // Transport structures. 2019. Vol. 6. No. 3. P. 25

25. Grishina A.N., Korolev E.V., Mikheev A.V., Gladkikh V.A. Moisture deformations of concrete subject to alkaline corrosion. Experimental results // Bulletin of Civil Engineers. 2020. No. 6 (83). Pp. 140-148.

26. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. The effect of the content of additives of thermally activated clay on the properties and composition of the hardening products of a composite slag-alkaline binder with a low content of an alkaline activator // Izvestiya Kazan State Architectural and Construction University. 2021. No. 2 (56). Pp. 50-59.

27. Fedjuk R.S. Properties of composite binders based on technogenic waste of the Far East // Bulletin of Civil Engineers. 2016. No. 2 (55). Pp. 132-136.

28. Kazanskaya L.F., Smirnova O.M. Supersulphated Cements with Technogenic Raw Materials // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. 9(11). Pp. 3006-3012.

29. Smirnova O.M., Kazanskaya L.F. Hybrid cements based on granular blast furnace slags: main research directions // Expert: theory and practice. 2022. No. 3 (18). Pp. 59-65.

30. Mehdizadeh H., Kani E.N., Sanchez A.P., Fernandez-Jimenez A. (2018). Rheology of activated phosphorus slag with lime and alkaline salts // Cement and Concrete Research, 113, 121-129.

31. Polak A.F., Babkov V.V., Andreeva E.P. Hardening of mineral binders. Ufa: Bashkir Publishing House, 1990. 216 p.

32. Kazanskaya L.F., Makarov Yu.I., Grigoriev D.S. Strength and durability of multicomponent mineral binders based on technogenic raw materials // News of the St. Petersburg University of Railway Transport. 2014. No. 1 (38). Pp. 75-81.

33. Kazanskaya L.F., Smirnova O.M. Alkaline activation binders: striving for an alternative to Portland cement // Cement and its application. 2015. No. 2. Pp. 137-140.

### Информация об авторах:

#### **Казанская Лилия Фаатовна**

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург, Россия,

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные материалы и технологии».

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

#### **Смирнова Ольга Михайловна**

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, Россия,

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительство горных предприятий и подземных сооружений».

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

**Information about authors:**

**Kazanskaya Liliya F.**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia,  
doctor in technical sciences, docent, professor of the department of «Building Materials and Technologies».  
E-mail: [yalifa@inbox.ru](mailto:yalifa@inbox.ru)

**Smirnova Olga M.**

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,  
candidate in technical sciences, docent, associate professor of the department Constructing Mining Enterprises and  
Underground Structures.  
E-mail: [smirnovaolgam@rambler.ru](mailto:smirnovaolgam@rambler.ru)

С.В. СОКОЛОВА<sup>1</sup>, М.Н. БАРАНОВА<sup>2</sup>, Д.И. ВАСИЛЬЕВА<sup>2</sup>, Ю.А. ХОЛОПОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения», г. Самара, Россия<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, Россия

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ОГНЕУПОРНОСТИ ЖАРСТОЙКИХ БЕТОНОВ**

***Аннотация.** В статье проанализированы вопросы вторичного использования промышленных отходов. Основным направлением развития строительного производства является применение новых материалов, снижение материалоемкости, обеспечение механизации и индустриализации строительства, увеличение эксплуатационных характеристик изделий и конструкций, внедрение безотходных технологий в производстве строительных материалов за счет использования отходов промышленных производств и уменьшения загрязнения. Важным является изготовление бетонов и растворов с повышенными физико-термическими свойствами для футеровок тепловых агрегатов, работающих в сложных эксплуатационных условиях (повышенная температура, агрессивная среда, контакт материала футеровки с газами, расплавами металлов и флюсов). Жаростойкие бетоны применяются в черной и цветной металлургии, химической и нефтеперерабатывающей, нефтехимической, энергетической, машиностроительной и целлюлозно-бумажной промышленности, в производстве строительных материалов. Внедрение жаростойкого бетона осуществляется путем применения новых конструктивных элементов для тепловых агрегатов, наиболее целесообразных с теплотехнической и с технологической сторон, что неосуществимо при использовании штучных керамических огнеупоров. Компоненты жаростойких бетонов – тонкомолотые добавки и заполнители обычно изготавливают из дорогостоящих материалов (шамота, муллита, хромита, магнезита, циркона и т.д.). Для изготовления добавок требуются энергозатратные операции по помолу и расसेву, усложняющие и удорожающие технологию производства заполнителей. Замена дефицитных и дорогих компонентов местными материалами и разработка технологии получения жаростойких бетонов на химических связующих с использованием недефицитных материалов, особенно отходов промышленности является важной задачей. Рассмотрены перспективы применения глиноземсодержащих отходов в качестве добавок в жаростойкие бетоны, что позволяет повысить долговечность и огнеупорность строительных материалов. Изучен отработанный тонкодисперсный катализатор ИМ-2201, который используется в нефтехимии и является алюмохромистым отходом. Изучены состав и свойства данного отхода и изменение свойств бетона при внесении добавок. Показано, что свойства бетонов меняются после введения в состав алюмохромистого отхода в заданном количестве (5, 10 и 15%). Повышается их средняя плотность, термическая прочность и другие свойства. Улучшение физико-термических характеристик зависит от структуры и новообразований в полученных образцах. Образцы бетона проанализированы при помощи петрографического метода и показано, что добавка алюмохромистого отхода способствует уплотнению структуры за счет заполнения порового пространства стекломассой и кристаллами новообразований в цементирующей массе.*

***Ключевые слова:** жаростойкие бетоны, промышленные отходы, вторичное использование отходов, алюмохромистые отходы.*

S.V. SOKOLOVA<sup>1</sup>, M.N. BARANOVA<sup>2</sup>, D.I. VASILIEVA<sup>2</sup>, Y.A. KHOLOPOV<sup>1</sup><sup>1</sup>Samara State Transport University, Samara, Russia<sup>2</sup>Samara State Technical University, Samara, Russia

## **POSSIBILITIES OF USING INDUSTRIAL WASTE TO IMPROVE HEAT RESISTANT CONCRETE DURABILITY AND REFRACTORINESS**

© Соколова С.В., Баранова М.Н., Васильева Д.И., Холопов Ю.А., 2023



**Abstract.** The article analyzes recycling of industrial waste. The main direction of construction production development is the use of new materials, reduction of material intensity, providing mechanization and industrialization of construction, increasing the operational characteristics of products and structures, the implementation of wasteless technologies in building materials at the expense of industrial waste and pollution reduction. It is important to produce concretes and mortars with enhanced physical and thermal properties for linings of thermal units operating in difficult operating conditions (high temperature, aggressive environment, contact of lining material with gases, metal melts and fluxes). Heat-resistant concretes are used in ferrous and non-ferrous metallurgy, chemical and oil refining, petrochemical, power, machine building, pulp and paper industry, in building materials. The introduction of heat-resistant concrete by using new structural elements for thermal units, the most appropriate from the thermal and technological side, which is not feasible when using piece ceramic refractories. Components of heat-resistant concretes - fine grind additives and aggregates are usually made of expensive materials (chamotte, mullite, chromite, magnesite, zircon, etc.). The production of additives requires energy-intensive milling and sieving operations, which complicate and increase the cost of aggregate production technology. The replacement of scarce and expensive components by local materials and the development of technology for obtaining heat-resistant concrete on chemical binders using non-deficient materials, especially industrial waste is an important task. The prospects of using alumina-containing wastes as additives in heat-resistant concretes, which allows increasing durability and refractoriness of construction materials. The used fine-dispersed catalyst IM-2201, which is used in petrochemistry and is an alumina-chromium waste, was studied. The composition and properties of this waste and the change in the properties of concrete with the introduction of additives have been studied. It was shown that the properties of concrete change after the introduction of alumina-chromium waste in a given amount (5, 10 and 15%). Their average density, thermal strength and other properties are increased. The improvement of physical and thermal characteristics depends on the structure and new formation in the obtained samples. Concrete samples were analyzed using petrographic method and it was shown that the addition of aluminochrome waste contributes to densification of the structure due to filling the pore space with glassy mass and newly formed crystals in the cementitious mass.

**Keywords:** heat-resistant concrete, industrial waste, waste recycling, aluminous chloride waste.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ali Allahverdi, Mostafa Mahinroosta, Recycling Aluminosilicate Industrial Wastes Into Geopolymer: A Review, Editor(s): Saleem Hashmi, Imtiaz Ahmed Choudhury, *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. Elsevier. 2020. Pp. 490-507. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11475-4>.
2. Mahfooz Soomro, Vivian W.Y. Tam, Ana Catarina Jorge Evangelista, 3 - Industrial and agro-waste materials for use in recycled concrete, Editor(s): Vivian W.Y. Tam, Mahfooz Soomro, Ana Catarina Jorge Evangelista, *In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering Recycled Concrete*. Woodhead Publishing. 2023. Pp. 47-117. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85210-4.00009-6>.
3. Yue Liu, Yan Zhuge, Wei Fan, Weiwei Duan, Lei Wang, Recycling industrial wastes into self-healing concrete: A review, *Environmental Research*, 2022. Vol. 214. Part 4. 113975. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113975>.
4. Changzai Ren, Shuang Wu, Wenlong Wang, Lei Chen, Yonghui Bai, Tingting Zhang, Huan Li, Yuxiao Zhao, Recycling of hazardous and industrial solid waste as raw materials for preparing novel high-temperature-resistant sulfoaluminate-magnesia aluminum spinel cement, *Journal of Building Engineering*, 2023. Vol. 64. 105550. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105550>.
5. Runfeng Li, Yang Zhou, Cuiwei Li, Shibo Li, Zhenying Huang, Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity, *Construction and Building Materials*, 2019. Vol. 213. Pp. 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.040>.
6. Chang Sun, Lulu Chen, Jianzhuang Xiao, Amardeep Singh, Jiahao Zeng, Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar, *Resources, Conservation and Recycling*, 2021. Vol. 170. 105561. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105561>.
7. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В.Ломоносова, 2022. 684 с.
8. Доклад об экологической ситуации в Самарской области за 2021 год. Выпуск 32. Самара, 2022. 162 с.
9. Гальцева Н.А., Попов П.В., Котов Д.А., Голотенко Д.С. Вторичное использование отходов промышленности // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5(89). С. 572-581.

10. Безденежных М.А., Муниева Э.Ю., Жуков А.Д. Строительные материалы и экология // Перспективы науки. Тамбов. 2017. № 11 (98). С. 39-42.
11. Иванова Т.А., Колесникова Л.Г. Оценка эффективности применения бетонного лома в качестве крупного заполнителя для бетона // Инженерный вестник Дона. 2022. № 3 URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7530.
12. Киянец А.В. Эффективность применения продуктов вторичной переработки полиэтилентерефталата в бетонах // Инженерный вестник Дона. 2022. № 2. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7487.
13. Перфилов В.А., Вольская О.Н. Утилизация промышленных отходов для повышения экологической безопасности окружающей среды // Юг России: экология, развитие. 2016. Т. 11. № 2. С. 205-212.
14. Хлыстов А.И., Соколова С.В., Баранова М.Н. [и др.] Перспективы использования глиноземсодержащих отходов промышленности в производстве жаростойких бетонов // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 7. С. 13-19. doi:10.18412/1816-0395-2021-7-13-19.
15. Васильева Д.И., Воронин В.В., Власов А.Г. Экологическое состояние окружающей среды как важнейший фактор развития территории // Здоровая окружающая среда - основа безопасности регионов: Материалы первого международного экологического форума в Рязани. Том II. Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2017. С. 33-36.
16. Васильева Д.И., Власов А.Г. Динамика земельного фонда Самарской области / Д. И. Васильева, // Биоэкологическое краеведение: мировые, российские и региональные проблемы : Материалы 5-й международной научно-практической конференции. / Отв. ред. С.И. Павлов. Самара: СГСПУ, 2016. С. 166-169.
17. Баженов Ю.М. Технология бетона. М., 2002. 500 с.
18. Арбузова Т.Б. Утилизация глиноземсодержащих осадков промстоков. Самара, 1991. 136 с.
19. Хлыстов А.И., Божко А.В., Соколова С.В., Рязов Р.Т. Получение прогрессивных и эффективных огнеупорных футеровочных материалов // First International Scientific-Technical Conference "Ecology and life protection of industrial-transport complexes». Сборник трудов. Тольятти, 2003. С. 186-189.
20. Соколова С.В. Исследование процессов структурной модификации жаростойких композитов растворами фосфатов/ Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Самара. 2006. 198 с.
21. Соколова С.В. Структурно-химическая модификация жаростойких композитов // Композиционные материалы: разработка и применение: монография / под ред. М.Ю. Звездиной. Новосибирск: Изд.АНС «СибАК». 2017. 180 с.
22. Хлыстов А.И. Жаростойкие бетоны на основе отходов промышленности Самарской области; монография. Самара: АСА СамГТУ, 2017. 171 с.

## REFERENCES

1. Ali Allahverdi, Mostafa Mahinroosta, Recycling Aluminosilicate Industrial Wastes Into Geopolymer: A Review, Editor(s): Saleem Hashmi, Imtiaz Ahmed Choudhury, *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, Elsevier, 2020. Pp. 490-507. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11475-4>.
2. Mahfooz Soomro, Vivian W.Y. Tam, Ana Catarina Jorge Evangelista, 3 - Industrial and agro-waste materials for use in recycled concrete, Editor(s): Vivian W.Y. Tam, Mahfooz Soomro, Ana Catarina Jorge Evangelista, In Woodhead Publishing *Series in Civil and Structural Engineering Recycled Concrete*, Woodhead Publishing, 2023. Pp. 47-117. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85210-4.00009-6>.
3. Yue Liu, Yan Zhuge, Wei Fan, Weiwei Duan, Lei Wang, Recycling industrial wastes into self-healing concrete: A review, *Environmental Research*, 2022. Vol. 214. Part 4. 113975. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113975>.
4. Changzai Ren, Shuang Wu, Wenlong Wang, Lei Chen, Yonghui Bai, Tingting Zhang, Huan Li, Yuxiao Zhao, Recycling of hazardous and industrial solid waste as raw materials for preparing novel high-temperature-resistant sulfoaluminate-magnesia aluminum spinel cement, *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 64. 105550. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105550>.
5. Runfeng Li, Yang Zhou, Cuiwei Li, Shibo Li, Zhenying Huang, Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity, *Construction and Building Materials*, 2019. Vol. 213. Pp. 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.040>.
6. Chang Sun, Lulu Chen, Jianzhuang Xiao, Amardeep Singh, Jiahao Zeng, Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar, *Resources, Conservation and Recycling*, 2021. Vol. 170. 105561. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105561>.
7. On the State and Protection of the Environment of the Russian Federation in 2021. State Report. Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, 2022. 684 p. (rus)

8. Report on the ecological situation in the Samara region for the year 2021. Issue 32. Samara, 2022. 162 p. (rus)
9. Galtseva N.A., Popov P.V., Kotov D.A., Golotenko D.S. Secondary use of industrial waste. *Engineering Herald of the Don*. 2022. No. 5(89). Pp. 572-581. (rus)
10. Bezdenezhnykh M.A., Munieva E.Y., Zhukov A.D. Construction materials and ecology. *Perspectives of Science*. Tambov. 2017. No. 11 (98). Pp. 39-42. (rus)
11. Ivanova T.A., Kolesnikova L.G. Evaluation of the effectiveness of concrete scrap as a coarse aggregate for concrete. *Engineering Herald of the Don*, 2022. No. 3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7530. (rus)
12. Kiyanets A.V. Effectiveness of polyethylene terephthalate recycled products application in concrete. *Engineering Herald of Don*, 2022. No. 2. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2022/7487. (rus)
13. Perfilov V.A., Volskaya O.N. Utilization of industrial waste to improve environmental safety. *South of Russia: Ecology, Development*. 2016. T. 11. No. 2. Pp. 205-212. (rus)
14. Khlystov A.I., Sokolova S.V., Baranova M.N. [et al.] Prospects of using alumina-containing industrial wastes in production of heat-resistant concretes. *Ecology and Industry of Russia*. 2021. T. 25. No. 7. Pp. 13-19. doi:10.18412/1816-0395-2021-7-13-19. (rus)
15. Vasilyeva D.I., Voronin V.V., Vlasov A.G. Ecological condition of environment as the major factor of territory development // Healthy environment - the basis of regional security: Materials of the First International Ecological Forum in Ryazan. Volume II. Ryazan: Ryazan State Agrotechnological University. P.A. Kostychev, 2017. Pp. 33-36. (rus)
16. Vasilyeva D.I., Vlasov A.G. Dynamics of the land fund of Samara region. Bio-ecological regionalism: world, Russian and regional problems : Materials of the 5th international scientific and practical conference. Ed. by S.I. Pavlov. Samara: SGSPU, 2016. Pp. 166-169. (rus)
17. Bazhenov Y.M. Concrete Technology. M. 2002. 500 p. (rus)
18. Arbuzova T.B. Utilization of alumina-containing industrial waste sludge. Samara, 1991. 136 p. (rus)
19. Khlystov A.I., Bozhko A.V., Sokolova S.V., Riyazov R.T. Preparation of progressive and effective refractory lining materials/ First International Scientific-Technical Conference "Ecology and life protection of industrial-transport complexes". Coll. of Papers, Pp. 186-189. Togliatti, 2003. (rus)
20. Sokolova S.V. Research of processes of structural modification of heat-resistant composites by the phosphate solutions (in Russian). Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. Samara. 2006. 198 p. (rus)
21. Sokolova S.V. Structural and chemical modification of heat-resistant composites // Composite materials: development and application: monograph. Edited by M.Yu. Novosibirsk: Publishing house ANS "SibAK". 2017. 180 p. (rus)
22. Khlystov A.I. Heat-resistant concretes based on industrial wastes of Samara region; monograph. Samara: ASA SamGTU, 2017. 171 p. (rus)

**Информация об авторах:**

**Соколова Светлана Владимировна**

ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения», г. Самара, Россия,  
кандидат технических наук, доцент кафедры Железнодорожный путь и строительство.  
E-mail: [sokolova9967@mail.ru](mailto:sokolova9967@mail.ru)

**Баранова Маргарита Николаевна**

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, Россия,  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики, инженерной геологии, оснований и фундаментов.  
E-mail: [mnbaranova@yandex.ru](mailto:mnbaranova@yandex.ru)

**Васильева Дарья Игоревна**

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара, Россия,  
кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры строительной механики, инженерной геологии, оснований и фундаментов.  
E-mail: [vasilievadi@mail.ru](mailto:vasilievadi@mail.ru)

**Холопов Юрий Александрович**

ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения», г. Самара, Россия,  
кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и экология».  
E-mail: [kholopov@bk.ru](mailto:kholopov@bk.ru)

### Information about authors:

**Sokolova Svetlana VI.**

Samara State Transport University, Samara, Russia,  
candidate of technical sciences, associate professor of Railway track and construction Department.  
E-mail: [sokolova9967@mail.ru](mailto:sokolova9967@mail.ru)

**Baranova Margarita N.**

Samara State Technical University, Samara, Russia,  
candidate of technical sciences, associate professor of structural mechanics, engineering geology, bases and foundations department.  
E-mail: [mnbaranova@yandex.ru](mailto:mnbaranova@yandex.ru)

**Vasilieva Daria Ig.**

Samara State Technical University, Samara, Russia,  
candidate of biological sciences, associate professor of structural mechanics, engineering geology, bases and foundations department.  
E-mail: [vasilievadi@mail.ru](mailto:vasilievadi@mail.ru)

**Kholopov Yuriy Al.**

Samara State Transport University, Samara, Russia,  
candidate of agricultural sciences, associate professor, Head of the Department "Life Safety and Ecology".  
E-mail: [kholopov@bk.ru](mailto:kholopov@bk.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 15.05.2023 г.  
Дата выхода в свет 20.06.2023 г.  
Формат 70×108/16. Печ. л. 8,4  
Цена свободная. Тираж 500 экз.  
Заказ № 159

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