

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

Редакция:  
**Акимов П.А.**, *акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*  
**Бакаева Н.В.**, *советник РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*  
**Бок Т.**, *д-р техн. наук, проф. (Германия)*  
**Булгаков А.Г.**, *д-р техн. наук, проф. (Германия)*  
**Ерофеев В.Т.**, *акад. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*  
**Есаулов Г.В.**, *акад. РААСН, д-р арх., проф. (Россия)*  
**Каприелов С.С.**, *акад. РААСН, д.т.н., проф. (Россия)*

**Колесникова Т.Н.**, *д-р арх., проф. (Россия)*  
**Колчунов В.И.**, *д-р техн. наук, проф. (Россия)*  
**Коробко А.В.**, *д-р техн. наук, проф. (Россия)*  
**Король Е.А.**, *чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*  
**Кривошапко С.Н.**, *д-р техн. наук, проф. (Россия)*  
**Кудряшов Н.Н.**, *канд. арх., проф. (Россия)*  
**Лефай З.**, *д-р техн. наук, проф. (Франция)*  
**Мелькумов В.Н.**, *д-р техн. наук, проф. (Россия)*  
**Орлович Р.Б.**, *д-р техн. наук, проф. (Польша)*  
**Птичкина 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)*

**Себешев В.Г.**, *почетный чл. РААСН, канд. техн. наук, проф. (Россия)*  
**Тамразян А.Г.**, *чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*

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

**Трещев А.А.**, *чл.-корр. РААСН, д-р техн. наук, проф. (Россия)*  
**Тур В.В.**, *иностран. чл. 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)*

Исполнительный редактор:

**Амелина М.А.**, *(Россия)*

Адрес редакции:  
302030, Орловская обл., г. Орёл,  
ул. Московская, д. 77.  
Тел.: +79065704999  
<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>  
E-mail: [str\\_and\\_rek@mail.ru](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](http://www.pressa-ru) и [www.akc.ru](http://www.akc.ru)

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2026

## Содержание

### Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции

- Арленинов П.Д.** Влияние типа армирования на ползучесть сжатых железобетонных элементов ..... 3
- Мирсаяпов И.Т., Павлов М.Н.** Напряженно-деформированное состояние сталефибробетонной полушпалы пути пониженной вибрации ..... 16
- Саиян С.Г., Васильев А.В.** Территориальная защита зданий и сооружений от поверхностных волн на основе сейсмического барьера в виде наземного жидкостного резервуара ..... 33

### Безопасность зданий и сооружений

- Смирнов В.А.** Совершенствование методов расчета прочности и надежности с учетом заданного времени эксплуатационного периода объекта ..... 51
- Ву Нзюк Туен, Басова Д.Н., Масленников М.Д., Ле Минь Туан.** Влияние деформаций сдвига на прогиб и коробление поперечного сечения консольной балки при прямом изгибе ..... 58
- Федоров В.С., Матвиенко П.А.** Теплотехническая задача огнестойкости железобетонной плиты перекрытия при пространственно неоднородном тепловом воздействии ..... 72

### Архитектура и градостроительство

- Федоровская А.А., Умнякова Н.П., Скасырская Ю.А., Шеина С.Г.** Методика обеспечения баланса между митигацией и адаптацией к изменениям климата при комплексном развитии территории ..... 82

### Строительные материалы и технологии

- Александрин А.В., Любавина К.В.** Влияния геометрических параметров на теплотехнические характеристики и материалоемкость строительных конструкций, возводимых методами аддитивного производства ..... 101
- Ковальчук В.С.** Влияние фуллереновой сажи на свойства тампонажных смесей ..... 110

- Рецензия на учебно-методическое пособие «Основы проектирования железобетонных высотных зданий» ..... 118

*Editor-in-Chief*

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

*Editor-in-Chief Assistants:*

**Gordon V.A.**, 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)

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

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

**Kaprielov S.S.**, doc. sc. tech., prof. (Russia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Sebeshev V.G.**, candidate 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)

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

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

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

*Managing Editor:*

**Amelina M.A.**, (Russia)

*The edition address:*

302030, Oryol region., Oryol,

Moskovskaya Street, 77

+79065704999

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

E-mail: [str\\_and\\_rek@mail.ru](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 №ФЦ 77-67169 from 16.09.2016 г.

Index on the catalogue of the «**Pressa Rossi**»

**86294** on the websites [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru) and

[www.akc.ru](http://www.akc.ru)

© Orel State University, 2026

## Contents

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

<b>Arleninov P.D.</b> Influence of reinforcement type on the creep of compressed reinforced concrete members.....	3
<b>Mirsayapov I.T., Pavlov M.N.</b> Stress-strain state of a steel-fiber-concrete half-sleep of a low-vibration track.....	16
<b>Saiyan S.G., Vasiliev A.V.</b> Area-wide protection of buildings and structures from surface waves using a seismic barrier implemented as an above-ground liquid storage tank.....	33

### **Building and structure safety**

<b>Smirnov V.A.</b> Improving strength and reliability assessment methods considering a specified service life.....	51
<b>Vu Ngoc Tuyen, Basova D.N., Maslennikov M.D., Le Minh Tuan.</b> Influence of shear deformations on deflection and barking of the cross section of a cantilizer beam under direct bending.....	58
<b>Fedorov V.S., Matvienko P.A.</b> Numerical study of the heat-transfer problem solution for a reinforced concrete floor slab within a fire compartment using Abaqus.....	72

### **Architecture and urban planning**

<b>Fedorovskaya A.A., Umnyakova N.P., Skasyrskaya Yu.A., Sheina S.G.</b> Methodology for ensuring a balance between mitigation and adaptation to climate change in the integrated development of the territory.....	82
---	----

### **Construction materials and technologies**

<b>Aleksanin A.V., Lyubavina K.V.</b> The influence of geometric parameters on thermal characteristics and material capacity of building structures constructed by additive manufacturing methods.....	101
<b>Kovalchuk V.S.</b> Effect of fullerene soot on the properties of grouting mixtures.....	110

<b>A Review of the Study Guide "Principles of Designing Reinforced Concrete High-Rise Buildings"</b>	118
--	-----

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.

П.Д. АРЛЕНИНОВ<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ ТИПА АРМИРОВАНИЯ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**Аннотация.** В статье представлены результаты комплексного экспериментального исследования влияния различных типов армирования на деформации ползучести сжатых железобетонных элементов. Актуальность работы обусловлена отсутствием в действующих нормативных документах (СП 63.13330.2018) методик учета стесняющего эффекта арматуры на ползучесть бетона, что может приводить к существенному завышению расчетных деформаций и неадекватной оценке жесткости конструкций при длительном нагружении. Была изготовлена и испытана серия из 62 образцов шести типов: контрольные бетонные призмы, призмы со стержневой арматурой, сталежелезобетонные призмы с внешним листовым армированием в трех вариантах исполнения, отличающихся длиной стержней – болтов и наличием поперечных стяжек, а также сталежелезобетонные образцы стенки. Проводились как кратковременные испытания до разрушения, так и длительные испытания при двух уровнях напряжений (0.3 и 0.5 от разрушающей нагрузки) в условиях одноосного и двухосного сжатия. Зафиксировано, что при одинаковом проценте армирования деформации ползучести образцов со стержневой арматурой в среднем на 20% превышают деформации образцов с внешним листовым армированием при уровне напряжений 0.3. При повышении уровня напряжений до 0.5 эта разница увеличивается до 25%. При двухосном сжатии образцов стенок продольные деформации ползучести снизились на 25% по сравнению с режимом одноосного сжатия, демонстрируя дополнительный резерв деформативности конструкций, работающих в замкнутых контурах. Полученные данные свидетельствуют, что игнорирование стесняющего эффекта арматуры в нормах может приводить к завышению коэффициентов ползучести для железобетонных элементов в 1.5–2 раза, а для сталежелезобетонных конструкций в условиях двухосного сжатия — до 3 раз. В работе обоснована необходимость дифференцированного подхода к учету влияния армирования в зависимости не только от его процента, но и от типа (стержневое, листовое), диаметра стержней и НДС элемента. Предложены направления для совершенствования нормативной базы.

**Ключевые слова:** ползучесть бетона, ползучесть железобетона, сталежелезобетонная конструкция, листовое армирование, уровень напряжения.

P.D. ARLENINOV<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center "Construction", Moscow, Russia

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

## INFLUENCE OF REINFORCEMENT TYPE ON THE CREEP OF COMPRESSED REINFORCED CONCRETE MEMBERS

**Abstract.** The relevance of this work stems from the absence, in current regulatory documents (SP 63.13330.2018), of methods for accounting for the restraining effect of reinforcement on concrete creep. This omission can lead to a significant overestimation of design deformations and an inadequate assessment of structural stiffness under long-term loading.

*A series of 62 specimens of six types was manufactured and tested: control concrete prisms, prisms with internal bar reinforcement, and steel-concrete prisms with external steel plate reinforcement. The latter were produced in three configurations, differing in the length of the tie rods and the presence of transverse ties, as well as steel-concrete web-type specimens. The testing program included both short-term tests until failure and long-term tests under two stress levels (0.3 and 0.5 of the ultimate load) under uniaxial and biaxial compression. It was recorded that, for the same reinforcement ratio, the creep deformations of specimens with internal bar reinforcement were, on average, 20% higher than those of specimens with external plate reinforcement at a stress level of 0.3. When the stress level was increased to 0.5, this difference grew to 25%. Under biaxial compression of the web-type specimens, longitudinal creep strains decreased by 25% compared to the uniaxial compression regime, demonstrating an additional reserve in the deformability of structures operating within closed contours. The obtained data indicate that neglecting the restraining effect of reinforcement in design codes can lead to an overestimation of creep coefficients by a factor of 1.5 to 2 for reinforced concrete elements, and by up to a factor of 3 for steel-concrete composite structures under biaxial compression. The study substantiates the necessity of a differentiated approach to accounting for the influence of reinforcement, depending not only on its ratio but also on its type (bar vs. plate), bar diameter, and the stress-strain state of the element. Directions for improving the current regulatory framework are proposed.*

**Keywords:** concrete creep, reinforced concrete creep, steel-concrete composite structure, sheet reinforcement, stress level.

## 1. Введение

Рассматривая ползучесть бетона в контексте расчета железобетонных элементов конструкций зданий и сооружений, в первую очередь стоит упомянуть таблицу 6.12 из свода правил 63.13330.2018, в которой прописываются регламентируемые коэффициенты ползучести  $\varphi_{b,cr}$  для разных классов бетона в зависимости от влажности среды. При необходимости учета в расчетах продолжительного действия нагрузок начальный модуль упругости бетона  $E_b$  умножается на коэффициент ползучести, и полученная величина – модуль деформаций – закладывается в расчетную модель.

Коэффициент ползучести – это параметр, который зависит от многих факторов, в частности, состава бетонной смеси, условий твердения, напряжения в образце, режима нагружения и т.д., и который можно получить экспериментально по результатам испытания по определению ползучести бетона в соответствии с ГОСТ 24544-2020. При этом реальные коэффициенты ползучести, полученные экспериментально, могут сильно отличаться от приведенных в своде правил, особенно это актуально для модифицированных высокопрочных бетонов [1]. То есть наиболее очевидным представляется получение экспериментального значения коэффициента ползучести непосредственно для используемого состава бетона, который после статистической обработки и будет использоваться в расчетах. Но при этом упускается из виду тот факт, что коэффициенты, указанные в таблице свода правил, снижают модуль упругости не элемента железобетонной конструкции, а бетона как материала. Это означает, что усредненные для указанных классов бетона коэффициенты ползучести, приведенные в СП, не учитывают сдерживающее влияние арматуры на ползучесть бетона при длительном деформировании реальной железобетонной конструкции. С одной стороны, это идет в определенный запас и подтверждается опытом обследования возведенных зданий и сооружений – обычно, если строительство выполнялось без нарушений, то реальные прогибы балок и перекрытий, существенно ниже получаемых по результатам пространственного расчета с учетом понижающих коэффициентов к модулю упругости. С другой стороны, когда необходимо знать действительное распределение жесткостей и напряжений в ответственных узлах конструкций зданий и сооружений, занижение жесткости отдельных элементов может быть уже не в запас.

Из этого следует, что нужны какие-то переходные коэффициенты, причем различающиеся в зависимости от процента армирования, диаметра, класса и профиля арматуры. Если же рассматривать современные сталежелезобетонные конструкции, то

исследования таких конструкций и в нашей стране, и за рубежом активно проводятся на протяжении последних десятилетий [2-4], причем это могут быть и железобетонные элементы с жесткой арматурой [5, 6], и перекрытия по профилированному листу [7, 8], и наименее изученные конструкции с внешним листовым армированием [9-12]. Для последних наименее изученными являются деформационные характеристики при кратковременных и длительных нагрузках, хотя отдельные исследования уже проводятся [13-15].

В существующих нормативных документах отсутствуют методики учета стесняющего эффекта арматуры на деформации ползучести. Если рассматриваются изгибаемые элементы с симметричным относительно центра тяжести сечения жестким и стержневым армированием, то учет арматуры сводится к использованию в формуле приведенной жесткости, например, в соответствии с СП 63.13330.2018 и СП 266.1325800.2016 (1).

$$D = E_{b1}(I + \alpha I_s + \alpha I_{st}) \quad (1)$$

где:

$E_{b1}$  – модуль деформации сжатого бетона, принимаемый в зависимости длительности действия нагрузки, а также при наличии или отсутствии трещин;

$I, I_s, I_{st}$  – моменты инерции площадей сечений бетона, стержневой и жесткой арматуры соответственно относительно центра тяжести сечения;

$\alpha$  – коэффициент приведения арматуры к бетону, равный  $E_s/E_{b1}$ .

Для внецентренно сжатых элементов в СП 63.13330.2018 приведена схожая формула, но в предельной по прочности стадии с дополнительными эмпирическими коэффициентами  $k_b$  и  $k_s$ . В соответствии с СП 430.1325800.2018 рекомендуется в первом приближении принимать значения понижающих коэффициентов к жесткости железобетонных элементов 0,6 и 0,3 (для вертикальных и горизонтальных конструкций соответственно). Фундаментального решения задачи стесняющего влияния арматуры на деформации ползучести, учитывающего все возможные типы конструкции и виды НДС, ни для инженерных расчетов, ни для теоретических моделей прогнозирования пока не существует. Отдельные подходы к решению данной проблемы можно найти в специализированной научной литературе, монографиях и диссертационных исследованиях, где влияние арматуры часто учитывается теоретическими или эмпирическими зависимостями.

Ниже приведен подход Галустова К.З. [16] к прогнозированию деформаций ползучести для центрально-сжатых стержней при постоянной нагрузке (2). Именно для такого вида НДС стержня должны разрабатываться условно базовые теории с возможностью их последующего применения для других сценариев работы конструкции путем использования в модели ползучести (автор использует свою двухкомпонентную теорию) модифицированного значения напряжений в бетоне через процент армирования  $\mu$ . Предполагается, что при совместности деформаций арматуры и бетона (3) ползет только бетон (при эксплуатационных нагрузках). Тогда в модель ползучести бетона (4) подставляются общие относительные деформации сечения (5), полученные из (2) и (3), в которых фигурирует процент армирования, и полученное интегральное уравнение решается относительно напряжений в бетоне с учетом ползучести. Как уже было сказано выше, в формуле (4) приведена модель ползучести Галустова К.З. на основе его двухкомпонентной теории [16], но такой подход может быть применен, по сути, к любой модели ползучести, имеющей схожую структуру уравнения.

$$N = \sigma_{ан}(t)F_a + \sigma_{бп}(t)F_б \quad (2)$$

$$= \varepsilon_a(t) = \varepsilon_б(t) = \varepsilon_{бп}(t) = \frac{\sigma_{ан}}{E_a} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{бп}(t) = \frac{\varepsilon_{бп}(t)}{E_б} - \int_{\tau_1}^t \sigma_{бп}(\tau) K(t - \tau) d\tau + \int_0^{max\sigma} \sigma_{бп}(t) F[T(\sigma_{бп}, t)] d\sigma \quad (4)$$

$$\varepsilon_a(t) = \varepsilon_{\text{бп}}(t) = \frac{1}{\mu E_a} \left[ \frac{N}{F_b} - \sigma_{\text{бп}}(t) \right] \quad (5)$$

где:

$N$  – продольное усилие в элементе;

$F_b$  и  $F_a$  – площади бетона и арматуры;

$\sigma_{\text{бп}}(t)$  и  $\sigma_{\text{ап}}(t)$  – напряжения в бетоне и в арматуре с учетом ползучести;

$\varepsilon_{\text{бп}}(t)$  и  $\varepsilon_{\text{ап}}(t)$  – относительные деформации бетона и арматуры с учетом ползучести;

$E_b$  и  $E_a$  – модули упругости бетона и арматуры;

$t, \tau, \tau_1, K, F, T$  – временные и функциональные характеристики (ядра и т.д.), входящие в уравнение ползучести.

Такой подход, как и подход Свода правил, рассмотренный выше, является несколько ограниченным, поскольку учитывается только объем арматуры в сечении элемента. При этом непосредственных экспериментальных данных, полученных в сопоставимых условиях на бетонных и железобетонных образцах-призмах при длительном сжатии, практически нет; такие испытания являются единичными. В работах [17, 18] по результатам испытаний, проведенных в БелдорНИИ в 70-х годах на армированных и неармированных образцах-призмах размерами 70x70x600 мм, описывается процесс перераспределения напряжений от бетона к стальной арматуре вследствие процесса ползучести – через 50 суток после начала эксперимента напряжения в арматуре возросли в 1,6 раза, что автоматически означает падение напряжений в бетоне на такую же величину и, как следствие, приводит к меньшим деформациям ползучести, поскольку уровень напряжений снизился. По результатам длительных испытаний полномасштабных образцов колонн 400x400 мм с арматурой большого диаметра Ø36 мм, проведенных Ю.Л. Крицманом в МНИИТЭП уже в 80-х годах, уровень напряжений в арматуре увеличился всего в 1,25 раза, хотя начальный уровень напряжений в бетоне был достаточно высокий и составлял 0,6 от разрушающей нагрузки; продолжительность эксперимента составляла 500 суток [14]. Анализируя эти данные, можно заметить, что перераспределение усилий с бетона на арматуру происходит по-разному, и, соответственно, сдерживающий эффект армирования может сильно отличаться для разных конструкций, а учет его только процентом армирования может привести к существенным погрешностям.

В связи с этим была поставлена цель: провести сравнительные длительные испытания бетонных и армированных образцов на бетоне одного состава, при этом учесть максимальное число различных факторов – тип армирования, уровень напряжения, тип НДС. Полученные данные дополняют существующую базу экспериментальных результатов и могут стать основой для уточнения методик расчета деформативности железобетонных конструкций, работающих в условиях длительного нагружения.

## 2. Модели и методы

В рамках эксперимента было подготовлено 62 образца шести типов (размеры и схема армирования по каждой модели приведены на рисунке 1). К первому типу (А) относятся контрольные бетонные образцы (модель М20): 3 образца испытывались кратковременной нагрузкой до разрушения с определением модуля упругости и разрушающей нагрузки; 3 образца испытывались в климатических камерах под длительной нагрузкой, равной 0,3 от разрушающей, в пружинных установках; 3 контрольных образца испытывались в климатических камерах без нагрузки (для определения усадки); 2 образца испытывались в климатических камерах под увеличенной длительной нагрузкой, равной 0,5 от разрушающей, в пружинных установках. Ко второму типу (В) относятся образцы-призмы, армированные стержневой арматурой (модель М17), с процентом армирования, соответствующим образцам с внешним листовым армированием; набор испытаний аналогичный модели М20. Третий тип

(С) представляют образцы-призмы с внешним листовым армированием (модель М18.1) и наличием поперечного армирования (стяжек); набор испытаний аналогичный модели М20. Четвертый тип (D) — образцы-призмы с внешним листовым армированием, с укороченными стад-болтами и поперечным армированием (модель М18.2); набор испытаний аналогичный модели М20, за исключением длительных испытаний при повышенных уровнях напряжений. Пятый тип (E) — образцы-призмы с внешним листовым армированием без поперечного армирования (модель М18.3); набор испытаний аналогичный модели М20, за исключением длительных испытаний при повышенных уровнях напряжений. К шестому типу (F) относятся образцы-стенки с внешним листовым армированием (модель М21), соответствующие увеличенной по ширине в 2 раза модели призмы М18.1: 3 образца испытывались кратковременной нагрузкой до разрушения с определением модуля упругости и разрушающей нагрузки; 2 образца испытывались под длительной нагрузкой, равной 0,3 от разрушающей, в специальных гидравлических установках повышенной мощности; 3 контрольных образца испытывались в климатических камерах без нагрузки (для определения усадки); 2 образца испытывались под длительной нагрузкой в режиме двухосного сжатия с соотношением продольной и поперечной нагрузки 1:0,4 в специальных гидравлических установках повышенной мощности с боковым обжатием пружинной системой (рисунок 2). Продольная нагрузка соответствовала длительным испытаниям при одноосном сжатии.

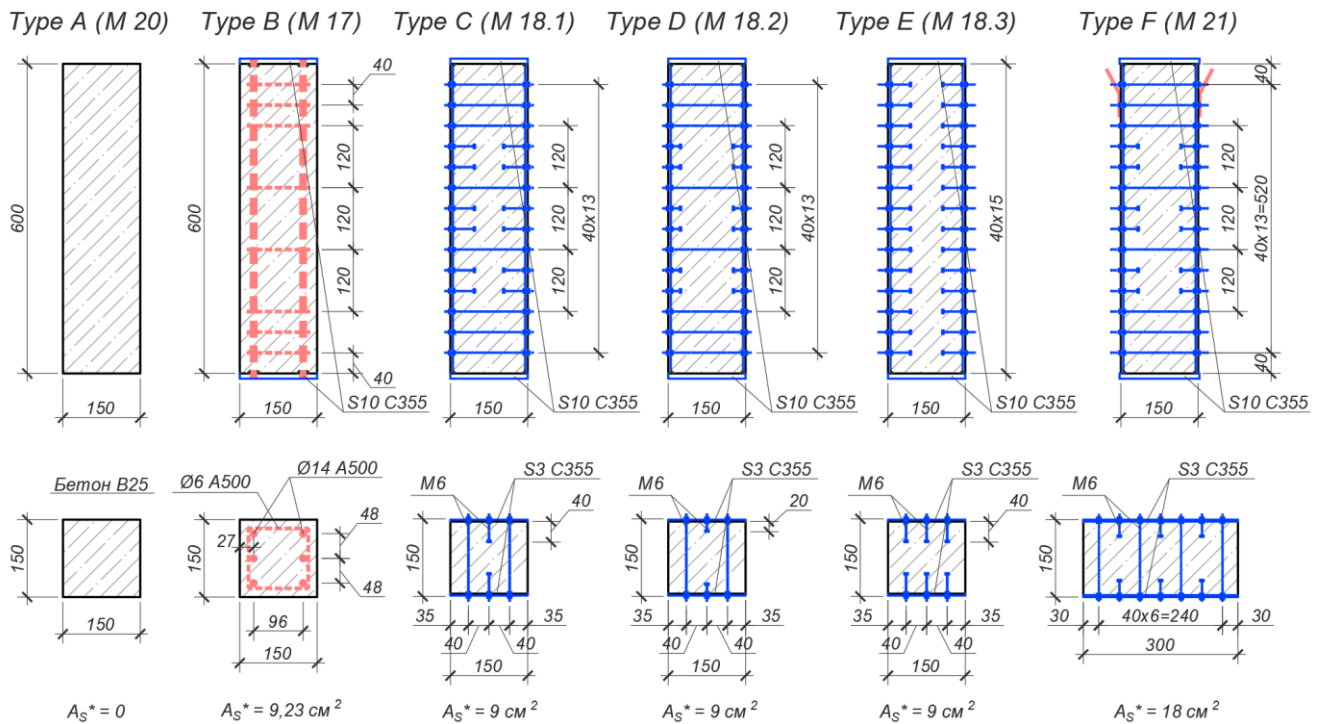


Рисунок 1 – Схема армирования образцов типов А, В, С, D, E, F

Таблица 1 – Состав бетонной смеси на 1 м<sup>3</sup>, кг

ЦЕМ П42,5Н	Песок	Щебень гранитный 5-20	Вода	Добавки ПСЕ 3135
250	1000	900	180	1,25

Съем информации с образцов производился с использованием электронного деформометра «DEMEC Mechanical Strain Gauge» с определением расстояния между метками, закрепленными на образце, с точностью измерения до 0,001 мм (принцип работы и порядок проведения таких измерений подробно описан в работе [15]), с контрольным использованием тензометрии.



*Рисунок 2 – Длительные испытания сталежелезобетонных образцов типа F в режиме двухосного сжатия*

Испытания проводились в климатических помещениях в соответствии с требованиями ГОСТ 24544-2020. Возраст образцов в момент испытания составлял 70–80 суток, что больше соответствует работе конструкций под длительно действующей нагрузкой, чем испытания в проектном возрасте 28 суток. После набора прочности образцы хранились в одинаковых температурно-влажностных условиях ( $W \approx 60\%$ ,  $T \approx 22^\circ\text{C}$ ) для минимизации влияния деформаций усадки на общие результаты.

### 3. Результаты исследования и их анализ

Результаты кратковременных испытаний приведены в таблице 2. Модуль упругости для армированных и сталежелезобетонных образцов определялся как для приведенного композитного сечения. Вид разрушения образцов при кратковременных нагрузках приведен на рисунке 3.



*Рисунок 3 – Вид разрушения армированных образцов типов B, C, D, E, F*

Таблица 2 – Сводные данные по определению призмной прочности и модуля упругости моделей М20, М17, М18.1, М18.2, М18.3, М21

Модель	Прочность приведенная МПа	Средняя прочность в серии, МПа	Модуль упругости, МПа	Среднее значение модуля упругости в серии, МПа	Длительная нагрузка, kN
<b>Образцы бетонные</b>					
М 20-1	29,2	25,3	29744	27302	170
М 20-2	23,9		26359		
М 20-3	22,9		25801		
<b>Образцы армированные</b>					
М 17-1	43,4	43,4	37098	35930	230
М 17-2	45,0		35681		
М 17-3	41,9		35010		
<b>Образцы сталежелезобетонные</b>					
М 18.1-1	46,2	44,2	38921	37053	230
М 18.1-2	43,0		36436		
М 18.1-3	43,3		35802		
М 18.2-1	40,4	42,1	35279	35583	230
М 18.2-2	43,2		36070		
М 18.2-3	42,6		35400		
М 18.3-1	42,5	45,4	36398	39002	230
М 18.3-2	46,9		41597		
М 18.3-3	46,9		39011		
М 21-1	43,8	39,5	33725	34171	460/184
М 21-3	35,1		34617		

Интересным результатом кратковременных испытаний являются близкие значения разрушающей нагрузки для сталежелезобетонных образцов с внешним листовым армированием, которые отличались длиной стад-болтов, а также наличием или отсутствием поперечных шпилек, при качественно разном характере разрушения. В предельном состоянии в образцах с поперечными шпильками в большинстве случаев происходит потеря устойчивости стального листа на участке между стяжек и для отдельных образцов – между стад-болтами, тогда как без поперечной арматуры происходит потеря устойчивости листа на большей длине с раскалыванием образца вдоль продольной оси. Такие результаты свидетельствуют о совместной работе стад-болтов и бетона, а также о том, что разрушение происходит от разрушения бетона внутри сечения и затем уже – потерей устойчивости стального листа. Однако с точки зрения механической безопасности, несмотря на близкие значения разрушающей нагрузки, предпочтительной является схема разрушения с поперечными стяжками, поскольку она не приводит к полному разрушению конструкции, что актуально для сейсмических и особых воздействий.

Для лучшего визуального восприятия, результаты по определению ползучести бетона представлены в графическом виде кривых общих деформаций ползучести и усадки (средние по серии) на рисунках 4–6, сгруппированные следующим образом: на рисунке 4 показаны образцы, армированные стержневой арматурой М17, образцы, армированные листовой арматурой в разном исполнении М18.1, М18.2, М18.3, а также контрольные бетонные образцы при уровне напряжений 0,3 от разрушающей нагрузки в соответствии с ГОСТ 24544-2020; на рисунке 5 представлены образцы, армированные стержневой арматурой М17, образцы, армированные листовой арматурой М18.1, и контрольные бетонные образцы при повышенных

уровнях напряжений – 0,5 от разрушающей нагрузки; на рисунке 6 приведены образцы стенки, армированных листовой арматурой М21, в режиме одноосного и двухосного сжатия, а также контрольные бетонные образцы при уровне напряжений 0,3 от разрушающей нагрузки в соответствии с ГОСТ 24544-2020 и дополнительной поперечной нагрузкой для образцов стенок – 0,12 от разрушающей нагрузки или 0,4 от вертикальной составляющей.

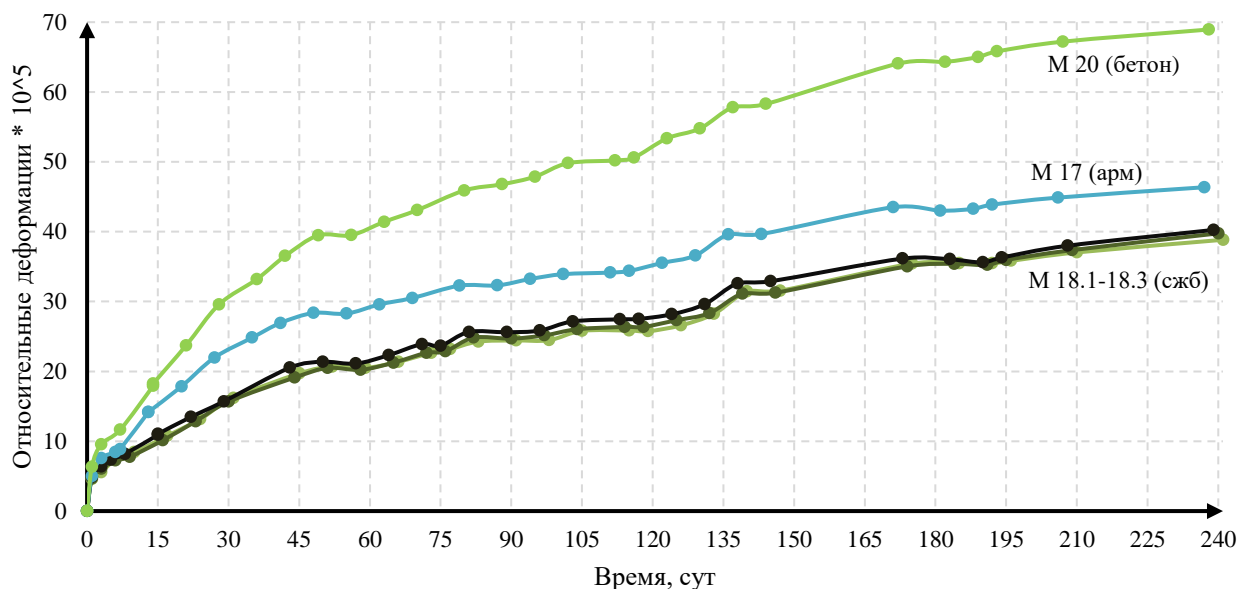


Рисунок 4 – Графики деформаций усадки и ползучести для образцов М17, М18.1, М18.2, М18.3, М20, М21 при стандартном уровне напряжений

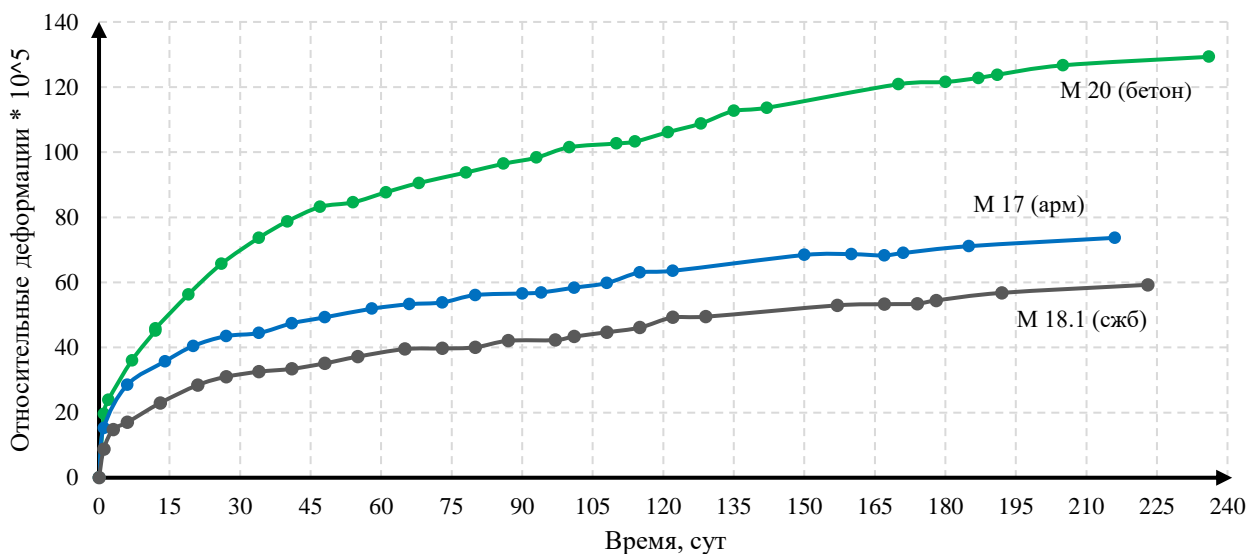


Рисунок 5 – Графики деформаций усадки и ползучести для образцов М17, М18.1, М20 при повышенном уровне напряжений

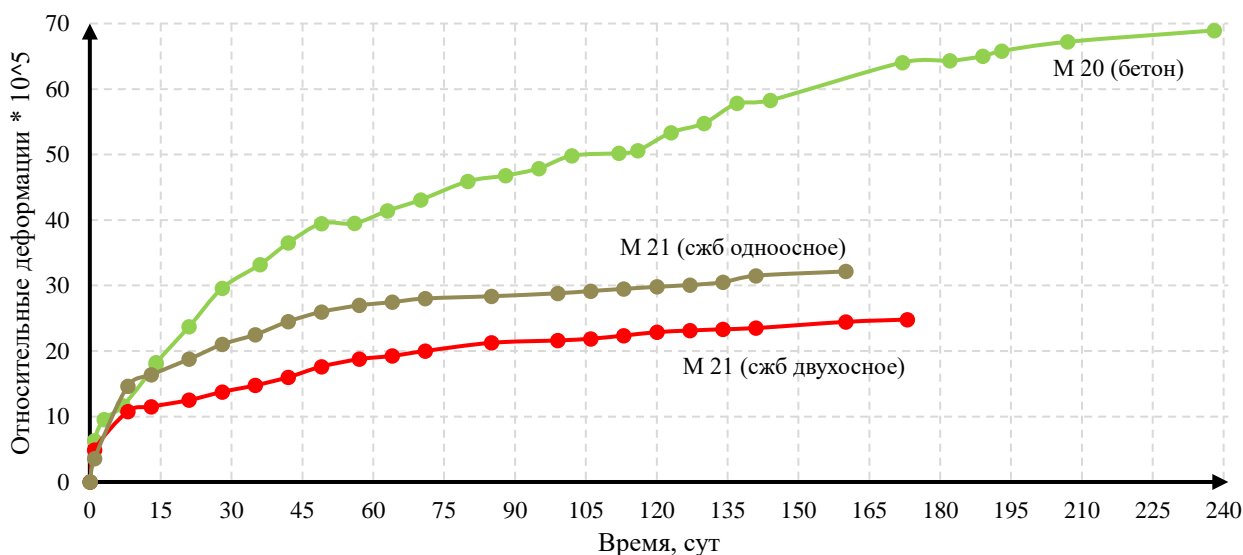


Рисунок 6 – Графики деформаций усадки и ползучести для образцов стенок M21 при одноосном и двухосном сжатии

Из графиков видно качественное отличие в полученных деформациях образцов различных типов – армированных стержневой арматурой, листовой арматурой и контрольных бетонных. Образцы с отличающимся между собой листовым армированием, а также образцы стенки показали близкие результаты, что свидетельствует, с одной стороны, о минимальном влиянии варьируемых факторов для образцов M18.1, M18.2, M18.3, а также о соответствии результатов образцов-призм и образцов-стенок (M21), что подтверждает возможность использования образцов-призм с внешним листовым армированием для моделирования конструкций стен, где такое армирование применяется. В целом результаты соответствуют физическим представлениям о процессе ползучести бетона. Зафиксированные отличия в результатах длительных испытаний образцов со стержневой и листовой арматурой при одинаковом проценте армирования являются новыми данными, при этом достоверность полученных результатов обеспечивается сравнительными испытаниями таких образцов при разных уровнях напряжений с получением качественно соответствующих друг другу результатов.

Такие результаты могут объясняться следующими факторами или их комбинацией: во-первых, лучшей и большей передачей усилий с бетона на стальной лист относительно стержневой арматуры в связи с большим объемом удельной поверхности стад-болтов, чем профиля арматуры, и соответственно релаксацией большей части напряжений в бетоне с передачей большего напряжения на металл, что соответствует более низким деформациям ползучести образца; во-вторых, различием в деформациях бетона в непосредственной близости от стального листа в зоне стад-болтов и бетона в середине сечения. В таком случае процесс деформирования происходит следующим образом: под длительно действующей нагрузкой в бетоне в средней части сечения возникают деформации ползучести, вследствие совместности деформаций бетона и стали часть напряжения берет на себя не только лист, но и условный объем бетона вблизи листа с частым расположением стад-болтов, который деформируется упруго. Однако этот объем не соответствует полному объему, в который попадают стад-болты, поскольку деформации ползучести образцов с различной длиной стяжных болтов показали близкие результаты и однозначно меньше такого объема, так как стад-болты занимают 2/3 условного сечения; в-третьих, наличием большого количества поперечных элементов внутри сечения с листовой арматурой (стад-болтов), включающихся в работу в поперечном направлении и стесняющих поперечные деформации образца. Для определения вклада того или иного из перечисленных факторов в общие результаты необходимы дальнейшие масштабные экспериментально-теоретические исследования.

Результаты параллельных длительных испытаний при одноосном и двухосном сжатии подтверждают возможные резервы при расчете по деформациям конструкций, в которых возможно такое напряженно-деформированное состояние. Это в первую очередь замкнутые стены небольшой длины или стены, имеющие граничные условия, стесняющие деформации вдоль стены (такие конструкции, например, применяются в зоне локализации аварии (ЗЛА) реакторных оболочек), и изгибаемые плиты, опертые по четырем сторонам – сжатая зона таких плит в середине пролета будет работать в режиме двухосного сжатия.

Ниже в сводной таблице 3 приведены коэффициенты ползучести для каждого типа образцов, определенные по последним полученным экспериментальным значениям. Учитывая значительный срок испытаний (за исключением моделей М21), такое сравнение более наглядно, чем расчет по предельным деформациям ползучести.

Таблица 3 – Сводные результаты максимальных экспериментальных деформаций ползучести и определенных коэффициентов ползучести по моделям М20, М17, М18.1, М18.2, М18.3, М21

	0,3R				0,5R			
	$\varepsilon_{п}(t_{max})$	$\frac{\varepsilon_{п}}{\varepsilon_{пМ20}}$	$\varphi_{bcr}$	$\frac{\varphi_{bcr}}{\varphi_{bcrМ20}}$	$\varepsilon_{п}(t_{max})$	$\frac{\varepsilon_{п}}{\varepsilon_{пМ20}}$	$\varphi_{br}$	$\frac{\varphi_{bcr}}{\varphi_{bcrМ20}}$
М20	50,73	1	2,18	1	111,06	1	2,22	1
М17	37,40	0,74	1,17	0,52	63,93	0,58	1,16	0,52
М18.1	30,84	0,61	1,03	0,47	48,81	0,44	0,91	0,41
М18.2	31,76	0,63	1,11	0,51				
М18.3	32,25	0,64	1,13	0,52				
М21 (о)	23,65	0,47	0,92	0,42				
М21 (д)	15,80	0,31	0,58	0,27				

Зная деформации ползучести отдельно бетона как материала и армированных конструкций из него были выполнены сравнительные расчеты жесткостей, одноосно сжатых образцов призм по двум сценариям – на основе только данных ползучести бетона по формуле (6), хотя данная формула является приближенной и не совсем точно описывает распределение жесткостей в сечении особенно при длительно действующих нагрузках [19], и на основе экспериментальных данных как для композитного материала по формуле (8). Дополнительно было произведено сравнение жесткостей при кратковременных нагрузках. Сводные результаты приведены в таблице 4. Из таблицы видно, расчетные жесткости с учетом ползучести практически идеально совпали с экспериментальными, но это при высоком проценте армирования в 9%. И даже при таком высоком проценте армирования (значительно выше большинства вертикальны конструкций жилых и общественных зданий) если вывести коэффициент снижения к начальной жесткости (0,46 для армированных образцов М17), полученное значение будет существенно ниже рекомендуемого СП 430 значения 0,6.

$$D = E_s A_s + E_b A_b \quad (6)$$

$$E_b = \frac{E_{b0}}{1 + \varphi_{b,cr}} \quad (7)$$

$$D_{\text{э}} = E_{\text{э}} A \quad (8)$$

где:

$E_s A_s$  – жесткость стали в сечении призмы, не зависящая от длительности действия нагрузки;  
 $E_b A_b$  – жесткость бетона в сечении, в качестве  $E_b$  принимается начальный или длительный модуль упругости определяемый по (7) или как для композитного материала  $E_{\text{э}}$  по таблице 2;  
 $\varphi_{b,cr}$  – коэффициент ползучести определяется по таблице 3.

Таблица 4 – Сводные результаты жесткостей для моделей М17, М18.1, определенных расчетным и экспериментальным путем

	$D_{кр}, \text{kN}\cdot 10^5$	$D_{крЭ}, \text{kN}\cdot 10^5$	$\Delta, \%$	$D_{ол}, \text{kN}\cdot 10^5$	$D_{олЭ}, \text{kN}\cdot 10^5$	$\Delta, \%$
М17	7,78	8,08	3,7	3,75	3,73	0,5
М18.1	7,74	8,34	7,1	3,70	3,98	7,1

#### 4. Заключение

1. В результате проведенных экспериментальных исследований (кратковременных и длительных испытаний при уровнях напряжений 0,3 и 0,5 от разрушающей нагрузки) получены новые данные о влиянии типа армирования на деформации ползучести бетона. Зафиксировано, что при одинаковом проценте армирования деформации ползучести в образцах со стержневой арматурой на 20–25 % выше, чем в образцах с внешним листовым армированием, причем эта разница увеличивается с ростом уровня напряжений. Испытания фрагментов стен в условиях двухосного сжатия показали снижение продольных деформаций ползучести на 25 % по сравнению с одноосным сжатием, что указывает на наличие неучтенных резервов деформативности замкнутых конструкций.

2. Установлено, что действующие нормативные документы не учитывают стесняющий эффект арматуры на ползучесть бетона, а существующие в литературе подходы, основанные только на проценте армирования, являются единичными и недостаточно апробированными. Сравнительный анализ результатов при разных уровнях напряжений выявил нелинейность нарастания деформаций ползучести (принцип аффинного подобия не работает): разница в деформациях между бетонными и армированными образцами при увеличении нагрузки с 0,3 до 0,5 возрастает с 26–39 % до 56 % соответственно, что свидетельствует о более жесткой работе железобетонных конструкций при повышении напряжений и также не отражено в нормах.

3. Полученные данные демонстрируют, что игнорирование типа армирования и вида напряженно-деформированного состояния может приводить к завышению расчетных деформаций ползучести более чем в 3 раза (для сталежелезобетона в условиях двухосного сжатия по сравнению с бетоном). Это обосновывает необходимость дифференцированного подхода к учету армирования в зависимости не только от его процента, но и от типа (стержневое, листовое), диаметра арматуры и условий нагружения.

4. В качестве развития исследований предлагается внесение изменений в нормативные документы (СП 63.13330.2018) в части уточнения коэффициентов ползучести для железобетонных и сталежелезобетонных конструкций, а также проведение дополнительного компьютерного моделирования для верификации полученных результатов и разработки практических рекомендаций. Предварительно при проектировании конструкций с двусторонним листовым армированием допускается использовать понижающий коэффициент 0,95 к нормативному коэффициенту ползучести.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каприелов С.С., Арленинов П.Д., Шенйфельд А.В., Калмакова П.С. Влияние относительной влажности воздуха на коэффициент ползучести высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2025. № 10. С. 25-35. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-840-10-25-35>
2. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современной науки. 2017. №4. С. 205-208.
3. Мартиросян, А.С. Травуш В.И., Кашеварова Г.Г. Исследование влияния геометрии жесткой арматуры на распределение нагрузки в элементах сталежелезобетонной конструкции // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 1. – С. 147-158. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.13
4. Коробов Л.А. Железобетонные защитные оболочки АЭС / Л.А.Коробов, О.К. Назарьев, Е.П. Карелин, Г.К. Хайдуков // М.: Атомиздат. - 1978.

5. Травуш В.И., Конин Д.В., Крылов А.С. Прочность железобетонных балок с жесткой арматурой из высокопрочного бетона // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 3(79). С. 36–4
6. Травуш В.И., Каприелов С.С., Конин Д.В., Крылов А.С., Чилин И.А. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на изгиб. // Строительство и реконструкция. 2017;(4):63-71.
7. Тамразян А.Г., Арутюнян С.Н. К оценке надежности сталежелезобетонных плит перекрытий с профилированными настилами // Вестник гражданских инженеров. 2015. №6(53). С. 52–57.
8. Замалиев Ф.С., Закиров М.А. Некоторые результаты численных исследований сталежелезобетонных перекрытий // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. №3(33). С. 56-63. URL: [izvestija.kgasu.ru/files/3\\_2015/56\\_63\\_Zamaliyev\\_Zakirov.pdf](http://izvestija.kgasu.ru/files/3_2015/56_63_Zamaliyev_Zakirov.pdf).
9. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Lai Z. Steel-Plate Composite (SC) Walls for Safety Related Nuclear Facilities: Design for In-Plane Force and Out-of-Plane Moments // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 269. – P. 240–249.
10. Soheil Shafaei, Amit H. Varma, Jungil Seo, Devin Huber, and Ron Klemencic. Wind Design of Composite Plate Shear Walls/Concrete Filled (SpeedCore) Systems // Engineering journal. 2022. Third quarte, Paper №. 2021-11, pp.183-208
11. Travush V.I. et al. Static bearing capacity of steel-plate composite walls // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2023. – Vol. 19. – No. 4. – P. 166–181. – doi: 10.22337/2587-9618-2023-19-4-166-181
12. Takeuchi M. et al. Study on a concrete fillet structure for nuclear power plants // Nuclear Engineering and Design. – 1998. – Vol. 179. – P. 209–223. – URL: [https://www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493\(97\)00282-3](https://www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493(97)00282-3) (дата обращения: 25.07.2024).
13. Travush V.I. et al. The stiffness of steel-plate composite structures for short-term loads // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2024. – Vol. 20. – No. 4. – P. 105–118. – doi: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-105-118
14. Травуш В.И., Конин Д.В., Крылов А.С., Арленинов П.Д. [и др.] Прочность и деформативность изгибаемых сталежелезобетонных элементов с листовым армированием с учетом трещин. Строительство и реконструкция. – 2025. – № 5(121). – С. 42-56. – DOI 10.33979/2073-7416-2025-121-5-42-56
15. Травуш В.И., Арленинов П.Д., Десяткин М.А. [и др.] Исследование ползучести сталежелезобетонных образцов // Строительство и реконструкция. – 2024. – № 1(111). – С. 49-63. – DOI 10.33979/2073-7416-2024-111-1-49-63. – EDN AETEPS.
16. Галустов К.З. Нелинейная теория ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций / К.З. Галустов. – М.: Изд. физ. мат. лит., 2006. - С. 94-110.
17. Галустов К.З. Влияние деформаций ползучести на характер перераспределения напряжений в центрально-сжатом железобетонном элементе. – Минск: Сб.тр. БелДорНИИ «Стр-во и эксп. автодорог и мостов», 1974.
18. Гвоздев А.А., Галустов К.З., Яшин А.В. Об уточнении линейной теории ползучести бетона //Инж. Жур. «Механика твердого тела», АН СССР, 6, 1967.
19. Травуш В.И., Конин Д.В., Рожкова Л.С. [и др.] Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на внецентренное сжатие // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 3. – С. 127-135. – EDN WWOFVZ.

## REFERENCES

1. Kapriyelov S.S., Arleninov P.D., Sheinfeld A.V., Kalmakova P.S. Influence of relative air humidity on the creep coefficient of high-strength self-compacting concretes. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2025;(10):25-35. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2025-840-10-25-35>
2. Babalich V.S., Androsov E.N. Steel-reinforced concrete structures and prospects for their application in Russian construction practice. *Uspekhi Sovremennoy Nauki [Advances in Modern Science]*. 2017;(4):205-208.
3. Martirosyan A.S., Travush V.I., Kashevarova G.G. Study of the influence of rigid reinforcement geometry on load distribution in elements of steel-reinforced concrete structures. *Vestnik PNRPU. Prikladnaya Ekologiya. Urbanistika [PNRPU Bulletin. Applied Ecology. Urban Studies]*. 2017;(1):147-158. DOI: 10.15593/2409-5125/2017.01.13
4. Korobov L.A., Nazar'ev O.K., Karelin E.P., Khaidukov G.K. *Reinforced concrete protective shells of nuclear power plants*. Moscow: Atomizdat; 1978.
5. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S. Strength of reinforced concrete beams with rigid reinforcement made of high-strength concrete. *Inzhenerno-Stroitel'nyy Zhurnal [Journal of Civil Engineering]*. 2018;79(3):36–46.

6. Travush V.I., Kapriellov S.S., Konin D.V., Krylov A.S., Chilin I.A. Experimental studies of steel-reinforced concrete structures under bending. *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya [Construction and Reconstruction]*. 2017;(4):63-71.
7. Tamrazyan A.G., Arutyunyan S.N. On the assessment of reliability of steel-reinforced concrete floor slabs with profiled decking. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*. 2015;(6):52–57.
8. Zamaliev F.S., Zakirov M.A. Some results of numerical studies of steel-reinforced concrete floors. *Izvestiya KGASU [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]*. 2015;(3):56-63. URL: [izvestija.kgasu.ru/files/3\\_2015/56\\_63\\_Zamaliev\\_Zakirov.pdf](http://izvestija.kgasu.ru/files/3_2015/56_63_Zamaliev_Zakirov.pdf)
9. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Lai Z. Steel-Plate Composite (SC) Walls for Safety Related Nuclear Facilities: Design for In-Plane Force and Out-of-Plane Moments. *Nuclear Engineering and Design*. 2014;269:240–249.
10. Shafaei S., Varma A.H., Seo J., Huber D., Klemencic R. Wind Design of Composite Plate Shear Walls/Concrete Filled (SpeedCore) Systems. *Engineering Journal*. 2022;(Third Quarter):183-208. Paper №. 2021-11.
11. Travush V.I., et al. Static bearing capacity of steel-plate composite walls. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023;19(4):166–181. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-4-166-181
12. Takeuchi M., et al. Study on a concrete fillet structure for nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design*. 1998;179:209–223. URL: [https://www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493\(97\)00282-3](https://www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493(97)00282-3) (Accessed: 25.07.2024).
13. Travush V.I., et al. The stiffness of steel-plate composite structures for short-term loads. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(4):105–118. DOI: 10.22337/2587-9618-2024-20-4-105-118
14. Travush V.I., Konin D.V., Krylov A.S., Arleninov P.D., et al. Strength and deformability of flexural steel-reinforced concrete elements with sheet reinforcement taking cracks into account. *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya [Construction and Reconstruction]*. 2025;(5):42-56. DOI: 10.33979/2073-7416-2025-121-5-42-56.
15. Travush V.I., Arleninov P.D., Desyatkin M.A., et al. Study of creep in steel-reinforced concrete specimens. *Stroitel'stvo i Rekonstruktsiya [Construction and Reconstruction]*. 2024;(1):49-63. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-111-1-49-63. EDN: AETEPS.
16. Galustov K.Z. *Nonlinear theory of concrete creep and calculation of reinforced concrete structures*. Moscow: Fiz. Mat. Lit. Publ.; 2006. p. 94-110.
17. Galustov K.Z. Influence of creep deformations on the nature of stress redistribution in a centrally compressed reinforced concrete element. In: *Collection of works of BelDORNII "Construction and Operation of Highways and Bridges"*. Minsk; 1974.
18. Gvozdev A.A., Galustov K.Z., Yashin A.V. On the refinement of the linear theory of concrete creep. *Inzhenernyy Zhurnal "Mekhanika Tverdogo Tela" [Engineering Journal "Mechanics of Solids"]*. AS USSR; 1967;(6).
19. Travush V.I., Konin D.V., Rozhkova L.S., et al. Experimental studies of steel-reinforced concrete structures under eccentric compression [Eksperimental'nye issledovaniya stalezhelezobetonnykh konstruktsiy, rabotayushchikh na vnesentrennoe szhatie]. *Academia. Architecture and Construction*. 2016;(3):127-135. EDN: WWOVFVZ.

#### Информация об авторах

##### Арленинов Петр Дмитриевич

Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия, кандидат технических наук, заместитель заведующего лаборатории Механики железобетона.

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

Доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций (ЖБК)

E-mail: arleninoff@gmail.com

#### Information about authors

##### Arleninov Petr D.

A.A. Gvozdev Reinforced Concrete Research and Technological Institute (NIIZHB), JSC "RIC "Construction", Moscow, Russia, PhD in Engineering, Deputy Head of the Reinforced Concrete Mechanics Laboratory.

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russia, Associate Professor, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures.

E-mail: arleninoff@gmail.com

Статья поступила в редакцию 05.02.2026

Одобрена после рецензирования 10.02.2026

Принята к публикации 13.02.2026

The article was submitted 05.02.2026

Approved after reviewing 10.02.2026

Accepted for publication 13.02.2026

ИЛШАТ.Т. МИРСАЯПОВ<sup>1</sup>, М.Н. ПАВЛОВ<sup>1</sup><sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЕ- ФИБРОБЕТОННОЙ ПОЛУШПАЛЫ ПУТИ ПОНИЖЕННОЙ ВИБРАЦИИ

**Аннотация.** В статье рассматривается решение актуальной проблемы ограничения трещинообразования в полушпалах, предназначенных для путей с пониженной вибрацией. В качестве эффективной конструктивной меры предлагается применение сталефибробетона, обладающего повышенными прочностными и деформативными характеристиками. Исследование, проведённое в два этапа, включало экспериментальные методы на натурных образцах и численное моделирование напряженно-деформированного состояния. В результате установлено, что сталефибробетонная полушпала превосходит традиционную железобетонную по несущей способности на 198 %. Также наблюдается многократный рост трещиностойкости: сопротивление образованию нормальных трещин увеличивается на 300 %, а наклонных — на 679 %. Полученные результаты подтверждают, что применение сталефибробетона позволяет не только выполнить строгие нормативные требования по трещиностойкости, но и существенно повысить общую надёжность и долговечность конструкции в условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** путь пониженной вибрации, сталефибробетон, численные исследования полушпал, экспериментальные исследования полушпал.

ILSHAT.T. MIRSAYAPOV<sup>1</sup>, M.N. PAVLOV<sup>1</sup><sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

## STRESS-STRAIN STATE OF A STEEL-FIBER-CONCRETE HALF-SLEEPER OF A LOW-VIBRATION TRACK

**Abstract.** The article addresses a pressing issue of limiting crack formation in semi-sleepers designed for tracks with reduced vibration. As an effective design solution, the use of steel-fiber-reinforced concrete (SFRC), which possesses enhanced strength and deformation characteristics, is proposed. The study, conducted in two stages, involved experimental methods on full-scale specimens and numerical modeling of the stress-strain state. The results established that the steel-fiber-reinforced concrete semi-sleeper surpasses the traditional reinforced concrete one in load-bearing capacity by 198%. Furthermore, a multiple increase in crack resistance was observed: resistance to the formation of normal cracks increased by 300%, and to inclined cracks—by 679%. The obtained results confirm that the application of steel-fiber-reinforced concrete not only allows for meeting stringent regulatory requirements for crack resistance but also significantly enhances the overall reliability and durability of the structure under service conditions.

**Keywords:** low-vibration track (LVT), steel fiber concrete, numerical studies of half-sleepers, experimental studies of half-sleepers.

## 1. Введение

Рост грузопотока и пассажиропотока приводит к увеличению массы, скорости и осевой нагрузки подвижного состава, что в свою очередь требует замену традиционных железнодорожных путей по деревянным и железобетонным шпалам на индустриальный путь пониженной вибрации (LVT – Low Vibration Track), который получил свое распространение и широко используется в Европе, США, Канаде, Тайване, Корее и Китае [1]. Данный путь представляет из себя железобетонные полушпалы в резиновых чехлах с подшпальными и подрельсовыми демпфирующими прокладками. Полушпалы укладывают на опорную плиту основания и затем замоноличивают путевым неармированным бетоном [2].

В работах [3], [4] отмечено, что резиновые прокладки существенно увеличивают скорость затухания вибрации, уменьшают ускорение, а также амортизируют прямой удар полушпал по плите. Трещиностойкость конструкции пути пониженной вибрации на основе эксперимента полномасштабной модели была изучена в [5]-[7]. Численная модель резинового чехла и прокладок – модель Mooney-Rivlin solid изучена в [8], [9]. В работе [10] была получена нагрузка отказа в ходе численного исследования, она составила 36 т. Механические характеристики пути пониженной вибрации также изучались на основе новой модели усталостного повреждения бетона с концентрацией микротрещин II типа для бетона [11]. НДС плиты основания пути было описано авторами [12]-[15]. Износ рельса и исследование работы рельса под действием динамических нагрузок пути пониженной вибрации были исследованы в работах [16], [17]. Усталость пути пониженной вибрации была исследована авторами [18], [19] в ходе экспериментального исследования. В выводах было отмечено снижение виброгасящих свойств резиновых прокладок, а также увеличение динамической и статической жесткости крепежных элементов пути. В ходе исследования динамических характеристик пути пониженной авторы [20], [21] выявили, что из-за удара рельса о полушпалу и полушпалы о путевую плиту наблюдается неравномерное развитие продольных растягивающих напряжений в плите в зоне под местом удара, что может привести к образованию трещин, а в полушпале продольные растягивающие напряжения уменьшаются, т.е. удар вызывает в ней дополнительные сжимающие напряжения. Авторы провели исследование [22], в ходе которого изменили угол наклона короткой стороны железобетонной полушпалы LVT, а в работе [23] модифицировали форму резинового чехла под новые размеры полушпалы, и на основе полномасштабного эксперимента показали, что это привело к уменьшению вибрации в рельсе, полушпале и путевом бетоне, увеличению несущей способности полушпалы, росту устойчивости к опрокидыванию рельса и расширению колеи.

Во всех исследованиях железобетонных полшупал LVT наблюдается возникновение трещин в нижней части полушпалы (в растянутой зоне). Нормами Российской Федерации шпалы должны быть испытаны для обязательного подтверждения их соответствия техническим требованиям, указанных в российском государственном стандарте ГОСТ 33320-2015 «Шпалы железобетонные для железных дорог» [24], в том числе обеспечение трещиностойкости данных конструкций. Для увеличения трещиностойкости полушпал предлагается использовать сталефибробетон Vf80 со стальной фиброй взамен тяжелому бетону В40. Сталефибробетон имеет ряд преимуществ в сравнении с обычным бетоном, главные из которых – повышенная прочность бетона на изгиб/растяжение, увеличение вибрационной стойкости бетона, препятствие раскрытию трещин. В патенте [25] описывается фибробетонная полушпала, армированная композитной арматурой, которая обладает повышенными характеристиками трещиностойкости, долговечности и отсутствием электрокоррозии. В работе [26] приводится сравнительный анализ полушпал для метрополитена, который показал, что полушпалы из фибробетона обладают более высокими прочностными характеристиками, они имеют большую прочность на сжатие и на растяжение при изгибе. В исследовании [27]-[29] показано, что модуль упругости фибробетона повышается пропорционально расходу стальных и стеклянных волокон и снижается при

введении полипропиленовых волокон, а характер разрушения при этом переходит из хрупкого в вязко-пластичный [30].

За основу данного исследования была взята работа [31], в которой на основе численных и экспериментальных исследований были проанализированы прочностные и деформативные характеристики полушпал LVT. Результаты исследования [31] показали, что при испытании железобетонных полушпал нормальные трещины образуются при бт, что недопустимо по требованиям российского государственного стандарта ГОСТ 33320-2015 «Шпалы железобетонные для железных дорог» [24]. Поэтому актуальной задачей остается повышение трещиностойкости данных конструкций. Целью данной работы является увеличение трещиностойкости данных полушпал за счет введения в бетон стальной фибры. Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Испытать сталефибробетонные образцы полушпал LVT для получения опытных данных в ходе экспериментальных исследований.
2. Полученные результаты верифицировать в ходе численных исследований в программном комплексе Ansys Workbench.
3. Провести сравнение прочностных и деформативных характеристик полушпал из обычного тяжелого бетона и сталефибробетона.

## 2. Методы и модели

### Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований было изготовлено и испытано 3 образца полушпал LVT на действие вертикальной статической нагрузки по аналогии с исследованием [31]. Полушпалы изготавливались в заводских условиях и поставлялись в лабораторию при КГАСУ (Казанском государственном архитектурно-строительном университете). Образцы изготавливались из сталефибробетона СФБТ В<sub>f80</sub> В<sub>f5</sub>.

Процент распределения фибры по объему 1%. Арматурный каркас полушпал выполнен по патенту [32], разработанного сотрудниками КГАСУ совместно с представителями АО «Казметрострой». Класс арматуры принят А500С, верхнее армирование представляет из себя 4 продольных стержня диаметром 10 мм, нижнее армирование – 4 продольных стержня диаметром 12 мм. Хомуты выполнены также из арматуры А500С, диаметр 8 мм. Общий вид и армирование полушпалы схематически представлены на рис. 1. Арматурный каркас представлен на рис. 2.

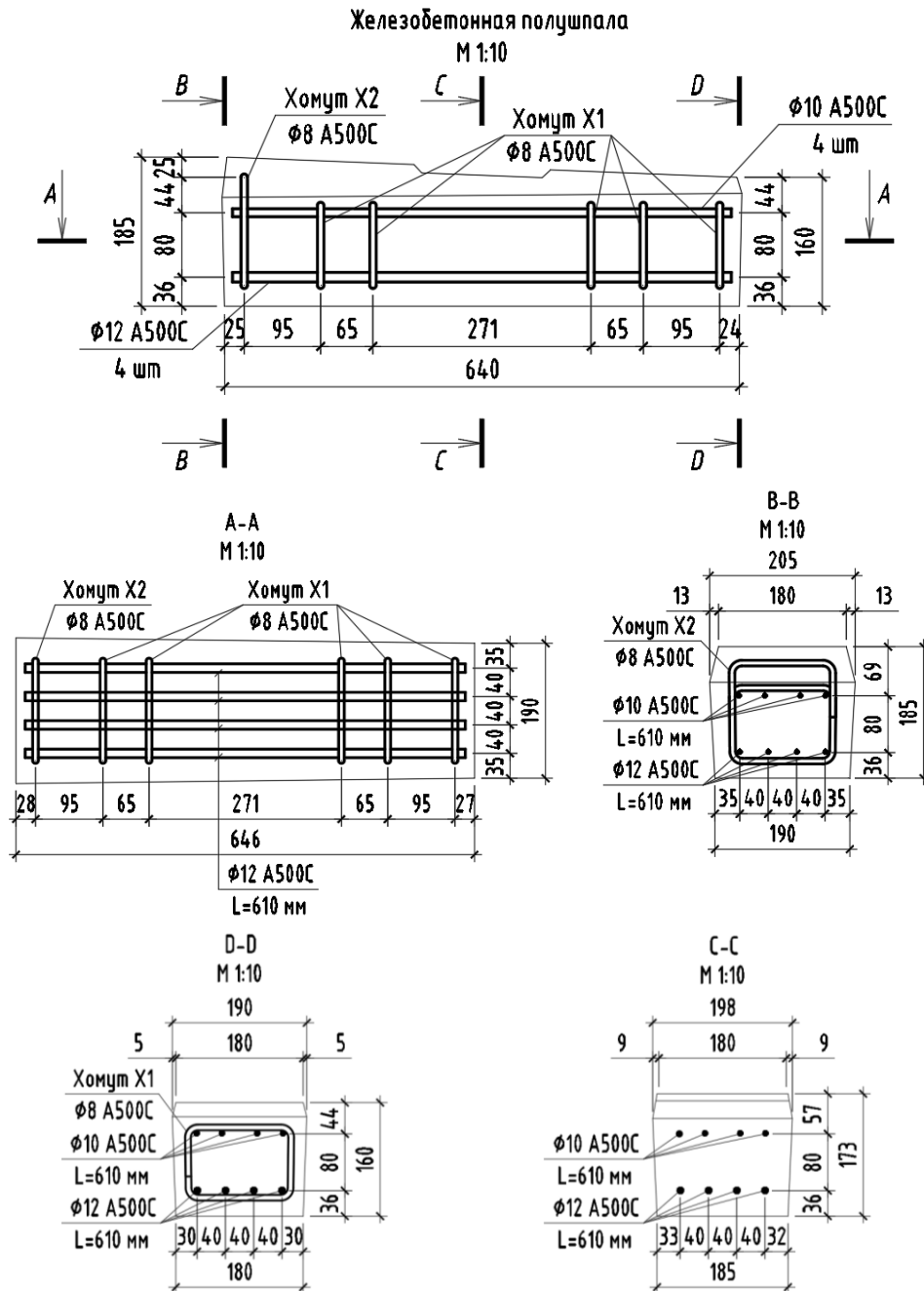
Значения прочностных характеристик сталефибробетонных полушпал были определены непосредственно в ходе лабораторных испытаний на заводе. Полученные данные приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1 - Характеристики сталефибробетона

№ образца	Содержания фибры, %	Призменная прочность на сжатие серии образцов, МПа	Класс прочности на сжатие	Прочность на растяжение серии образцов-балок на изгиб, МПа	Класс прочности на растяжение
1	1	60.7	В <sub>f80</sub>	7.9	В <sub>f5</sub>
2		60.5		7.4	
3		60.3		7.2	
	Среднее значение	60.5	Среднее значение	7.5	

Таблица 2 - Характеристики стальной стержневой арматуры

№ образца	Армирование образцов	Сопротивление на растяжение, МПа
1 - 3	4 Ø12 A500C 4 Ø10 A500C хомуты Ø8 A500C	500





*Рисунок 2 – Арматурный каркас полушпалы*

Значения прочностных характеристик сталефибробетонных полушпал были определены непосредственно в ходе лабораторных испытаний на заводе. Полученные данные приведены в табл. 1 и 2.

В процессе экспериментального исследования было испытано 3 образца сталефибробетонных полушпал. Испытание подготовленных образцов осуществлялись в учебно-лабораторном центре при КГАСУ. Для проведения испытаний использовались индикаторы часового типа, металлические измерительные линейки. Для того, чтобы провести более точный сравнительный анализ образцов из тяжелого бетона и фибробетона, армированных стальной стержневой арматурой, методика испытания, схема испытания, форма и размеры образцов принимались по аналогии с исследованием [31].

Перед нагружением проводилась съемка начальных показаний приборов, замерялись размеры образцов, фиксировали существующие дефекты. Нагрузка прикладывалась через стальную пластину пресса от 0 до 250 т с шагом нагружения 15 т. Каждая ступень загрузки сопровождалась выдержкой не менее 10 мин для стабилизации деформаций в полушпале. В этот промежуток времени обязательно снимались показания приборов и проводились необходимые замеры образца. Для определения осадок в нижних угловых точках полушпалы применялись индикаторы часового типа. Испытания проводились до отказа образцов.

#### **Численные исследования**

Численные исследования сталефибробетонных полушпал осуществлялись с помощью расчетного программного комплекса Ansys Workbench. В данном комплексе был проведен расчет сталефибробетонных полушпал с учетом нелинейной диаграммы деформирования сталефибробетона и стали, развития и раскрытия трещин [33]. Граничные условия, расчетная схема и загрузки использовались по аналогии с исследованием [31].

Моделирование железобетонного тела реализовано с помощью конечных элементов типа «solid 185/186» с размером сетки 25 мм. Арматурные стержни реализованы с помощью конечных элементов типа «beam 188» в виде стержней, приборазованных в элементы «reinforcement».

Характеристики материалов задавались с учетом нелинейной диаграммы деформации стали и бетона во вкладке «Engineering Data». Для сталефибробетона принята трехлинейная диаграмма работы в соответствии с пунктом 5.2.9 российского свода правил СП 360.1325800.2017 «Конструкции сталефибробетонные» (с Изменением N 1) [34], в программном комплексе задавалась теория прочности и пластичности бетона «Menetrey-Willam» [35]. Образование и раскрытие трещин учитывается с помощью модели

разупрочнения бетона «HSD6» (Hardening-Softening and Dilatation). Далее представлены характеристики сталефибробетона (см. табл. 3).

Таблица 3 - Физические и механические свойства сталефибробетона в Ansys Workbench (Engineering Data)

№	Название параметра	Значение	Ед. изм.
Базовые параметры материала (бетона)			
1	Плотность (Density)	2400	кг/м <sup>3</sup>
2	Условный модуль упругости бетона (Young's Modulus)	42250	МПа
3	Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0.2	-
Menetrey-Willam Base (Менетри-Виллам базовый параметры)			
4	Прочность бетона при одноосном сжатии (Uniaxial Compressive Strength)	60.5	МПа
5	Прочность бетона при одноосном растяжении (Uniaxial Tensile Strength)	7.5	МПа
6	Прочность бетона при двухосном сжатии (Biaxial Compressive Strength)	72.6	МПа
7	Угол дилатации бетона при сдвиге (Dilatancy Angle)	13	град.
Softening HSD 6 (разупрочнение по экспоненциальному закону)			
8	Пластические относительные деформации бетона, соответствующие вершине диаграммы (Plastic Strain at Uniaxial Compressive Strength)	0.0016946	мм/мм
9	Предельные пластические относительные деформации, соответствующие началу участка разупрочнения бетона (Plastic Strain at Transition from Power Law to Exponential Softening)	0.0029798	мм/мм
10	Относительные сжимающие напряжения в бетоне в конце упругого участка диаграммы (Relative Stress at Start of Nonlinear Hardening)	0.6	-
11	Относительные сжимающие напряжения в бетоне, соответствующие предельным относительным деформациям, соответствующие началу участка разупрочнения бетона (Residual Relative Stress at Transition from Power Law to Exponential Softening)	0.85	-
12	Остаточные относительные сжимающие напряжения в бетоне в стадии полного разрушения (Residual Compressive Relative Stress)	0.2	-
13	Внутренняя энергия деформирования единичной площадки при растяжении (Mode 1 Area Specific Fracture Energy)	155.55	Н/м <sup>-1</sup>
14	Остаточные относительные растягивающие напряжения в бетоне, соответствующие трещинообразованию (Residual Tensile Relative Stress)	0.1	-

За основу диаграммы деформирования для арматуры была принята двухлинейная диаграмма деформации Прандтля в соответствии с российским сводом правил СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» (с Изменениями N 1, 2) [36], в программном комплексе использовалась модель Multilinear Isotropic Hardening (Мультилинейная изотропная модель упрочнение стали). Характеристики стали арматуры представлены в табл. 4.

Таблица 4 - Физические и механические свойства стальной стержневой арматуры в Ansys Workbench (Engineering Data)

№	Наименование параметра	Пояснение к параметру	Ед. изм.
Базовые параметры материала (бетона)			
1	Плотность (Density)	7850	кг/м <sup>3</sup>
2	Условный модуль упругости стали (Young's Modulus)	2.0 · 10 <sup>5</sup>	МПа

Продолжение Таблицы 4

3	Коэффициент Пуассона (Poisson's Ratio)	0.3	-
Multilinear Isotropic Hardening (Мультилинейная изотропная модель упрочнение стали)			
4	Параметры в таблице (относительные деформации)	Значение: 0	мм/мм
		Значение равняется пределу упругой работы диаграммы: $\varepsilon_{s0} = 0.0025$	мм/мм
		Значение равняется пределу площадки текучести диаграммы: $\varepsilon_{s2} = 0.0025$	мм/мм
5	Параметры в таблице (напряжения)	Значение: $10^{-10}$	МПа
		Значение равняется началу текучести стали: 500	МПа
		Значение равняется пределу текучести стали: 500	МПа

Для корректной передачи усилий от стальных пластин к сталефибробетонному блоку в Ansys Mechanical создавались контакты «Frictional» между этими элементами с коэффициентом трения равным 0.1, если предположить, что работа силы трения переходит в потенциальную энергию формоизменения резиновых прокладок.

Для исключения возникновения углов поворота, смещений были приняты следующие граничные условия: 1) верхняя поверхность стальной пластины (пресс) закреплялась с помощью ограничения вида «Displacement», которое ограничивает перемещения по X и Y; 2) нижняя поверхность опорной стальной пластины ограничена от перемещений и поворотов во всех плоскостях с помощью закрепления «Fixed Support».

Приняты следующие силовые воздействия на испытуемый образец: 1) Собственный вес «Standard Earth Gravity»; 2) на верхнюю поверхность стальной пластины (пресс) задана осевая статическая нагрузка «Force» с значением:  $F=2400000$  N= $244.732$  т.

### 3. Результаты исследования и их анализ

#### Экспериментальные исследования

Результаты эксперимента приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты экспериментального исследования

Цель испытания	№ испытываемого элемента	Несущая способность, т	Нагрузка трещинообразования, т	
			Нормальные трещины	Наклонные трещины
Определение несущей способности	1	236	44	122
	2	239	23	98
	3	234	23	90
	Среднее значение, т	236.33	30	103.33

Среднее значение несущей способности полушпал составила  $R_{ult} = 236.33$  т, первые нормальные трещины полушпалы образовались при средней нагрузке равной  $R_{cr1} = 30$  т, наклонные при  $R_{cr2} = 103.33$  т.

На рис. 3-5 показаны фотографии, сделанные в ходе экспериментального исследования.



На рис. 5 можно заметить, что отказ конструкции происходит в результате местного сжатия под площадкой нагружения, предположительно из-за образования клина уплотнения, который после образования начинает «заклиниваться». Появление трещин происходит в следующем порядке: сначала образуются нормальные трещины, в среднем при нагрузке  $P_{срс1} = 30$  т, затем возникают наклонные трещины при нагрузке  $P_{срс2} = 103.33$  т. Последние трещины имеют наклон к вертикальной плоскости за счет наклона верхней поверхности полушпалы.

В работе [31] несущая способность полушпалы из тяжелого бетона В40 составляет  $P_{ult3} = 79.33$  т. Образование трещин имеет схожий характер. При этом первые нормальные трещины образовались в среднем при нагрузке  $P_{срс1} = 7.5$  т, а наклонные при  $P_{срс2} = 13.25$  т. Как видно из результатов, при введении стальной фибры в бетон, несущая способность полушпалы выросла на 198% или в 2.97 раз. Нагрузка трещинообразования также увеличилась на 300% (для нормальных трещин) и 665.4% (для наклонных трещин). Вид разрушения полушпалы имеет схожий характер.

#### Численные исследования

Отказ конструкции наблюдался на 0.88891 секунде после начала загрузки элемента в численной модели, несущая способность составила:  
 $P_{ult2} = 2400000 \times 0.88891 = 213384N = 217.55m$

Результаты численного исследования показаны в табл. 6. Средняя прочность сталефибробетона на сжатие была принята  $R_{fb} = 60.5$  МПа, на растяжение  $R_{fbt} = 7.5$  МПа. Расчетные сопротивления арматуры на растяжение и сжатие, а также значения относительных деформаций сталефибробетона и арматуры приняты в соответствии с СП 360.1325800.2017 «Конструкции сталефибробетонные» (с Изменением N 1) [34] и СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» (с Изменениями N 1, 2) [36].

Таблица 6 - Результаты численного моделирования

Исследуемый фактор	Растяжение/ сжатие	Максимальное значение напряжения в элементе в момент отаказа, МПа	Максимальное значение относительных деформаций, мм/мм	Предельно допустимые значения
Нормальные напряжения в сталефибробетоне по оси Z	Сжатие	86.65	-	60.5
	Растяжение	2.12	-	7.5
Нормальные напряжения в сталефибробетоне по оси X	Сжатие	63.06	-	60.5
	Растяжение	8.53	-	7.5
Нормальные напряжения в продольной арматуре	Сжатие	-	-	500
	Растяжение	301.62	-	
Нормальные напряжения в поперечной арматуре	Сжатие	-	-	500
	Растяжение	27.13	-	
Относительные деформации сталефибробетона	Сжатие	-	0.0018	0.003
	Растяжение	-	0.00033	0.004
Относительные деформации арматуры	Сжатие	-	0.000	0.025
	Растяжение	-	0.00096	0.025

Напряжения растянутого сталефибробетона составляют  $\sigma_{числ}^+ = 8.53$  МПа, сжатого –  $\sigma_{числ}^- = 86.65$  МПа, что выше значений максимальных растягивающих и сжимающих напряжений, полученных в работе [31]  $\sigma_{числ}^+ = 2.237$  Мпа и  $\sigma_{числ}^- = 43.6$  МПа. Полученные значения выше на 281.31% и на 98.74% соответственно после введения стальной фибры в бетон. По сравнению с работами [5,10,22], в которых максимальные растягивающие напряжения составляют 2.14–2.94 МПа.

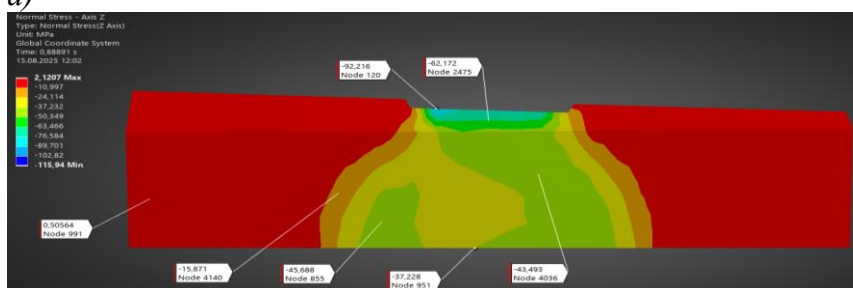
В момент разрушения локальные сжимающие напряжения сталефибробетона (под пластиной загрузки в верхней части полушпалы) на 43.22%, максимальные растягивающие напряжения на 13.73 МПа. Стоит отметить, что напряжения в продольной и поперечной арматуре не достигли своих пределов прочности и работают лишь на 60.3% и 5.4% от предела текучести. В работе [31] напряжения в продольной и поперечной арматуре составляют  $\sigma_{S \text{ числ}}^+ = 95.62$  МПа и  $\sigma_{SW \text{ числ}}^+ = 14.53$  МПа, их значения выросли по сравнению с полученными данными на 215.4% и на 86.72%.

На рис. 6 и 7 показано распределение напряжений и относительные деформации в продольном сечении полушпалы по осям Z и X соответственно.

На рис. 8 и 9 показано распределение напряжений и относительные деформации в поперечном сечении полушпалы по осям Z и X соответственно. Отсюда видно, что в сечении растягивающие и сжимающие напряжения и предельные относительные деформации растянутого сталефибробетона превышают свои предельные значения.

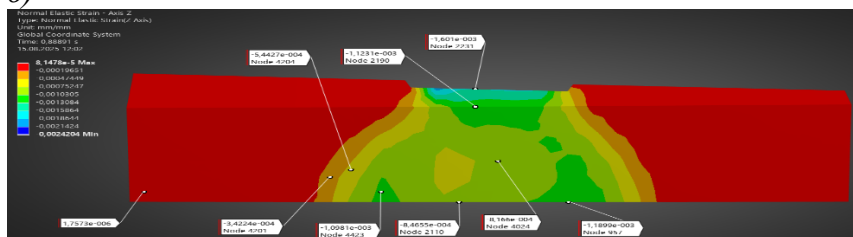
На рис. 10 и 11 представлены эпюры напряжений и деформаций поперечного сечения полушпалы по осям Z и X соответственно.

а)

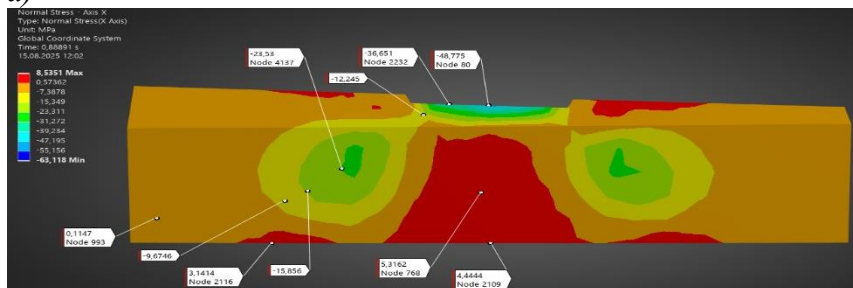


**Рисунок 6 –  
Распределение  
напряжений и  
относительных  
деформаций по оси Z:**  
а) нормальные  
напряжения в поперечном  
сечении полушпалы (МПа);  
б) относительные  
деформации в поперечном  
сечении полушпалы  
(мм/мм)

б)

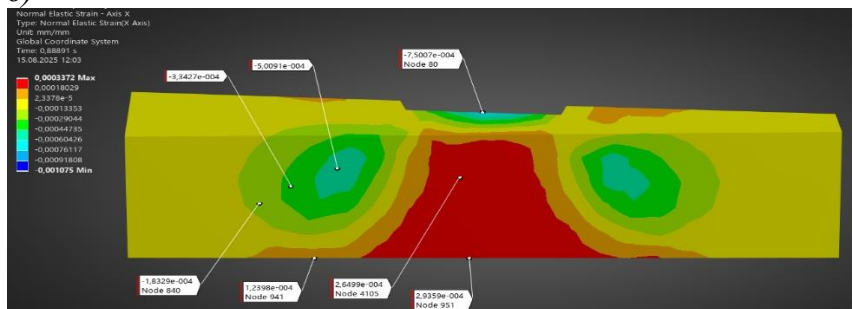


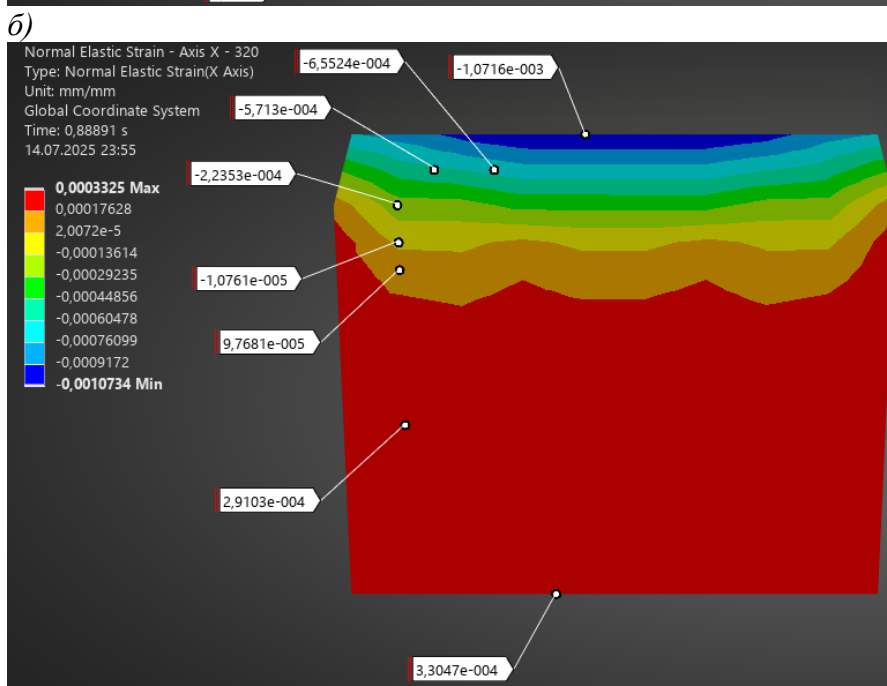
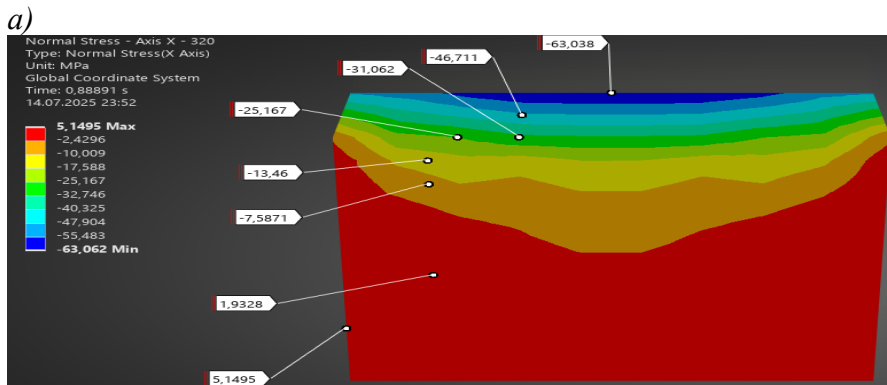
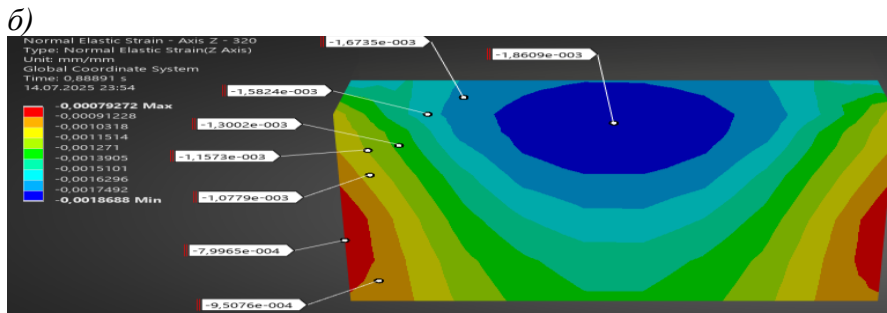
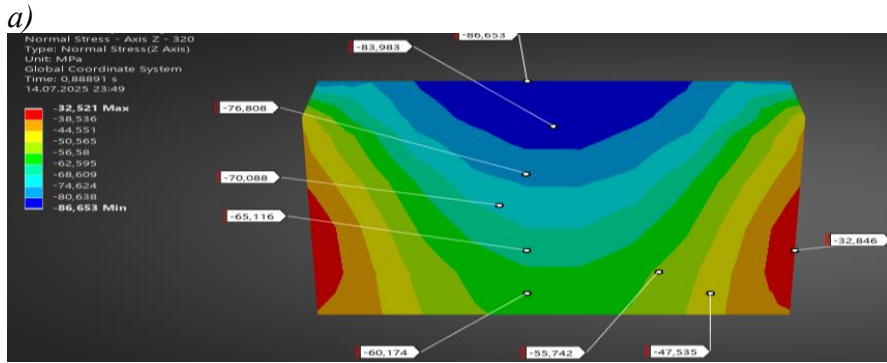
а)



**Рисунок 7 –  
Распределение  
напряжений и  
относительных  
деформаций по оси X:**  
а) нормальные  
напряжения в поперечном  
сечении полушпалы (МПа);  
б) относительные  
деформации в поперечном  
сечении полушпалы  
(мм/мм)

б)





**Рисунок 8 –  
Распределение  
напряжений и  
относительных  
деформаций по оси Z:**  
а) нормальные  
напряжения в  
поперечном сечении  
полушпалы (МПа)  
б) относительные  
деформации в  
поперечном сечении  
полушпалы (мм/мм)

**Рисунок 9 –  
Распределение  
напряжений и  
относительных  
деформаций по оси X:**  
а) нормальные  
напряжения в  
поперечном сечении  
полушпалы (МПа)  
б) относительные  
деформации в  
поперечном сечении  
полушпалы (мм/мм)

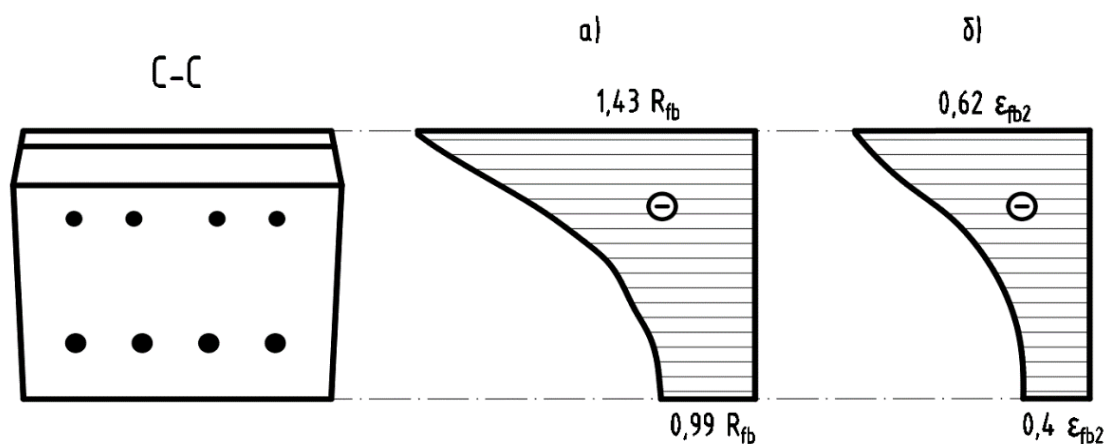


Рисунок 10 - Эпюры напряжений и деформаций по оси Z в поперечном сечении C-C:  
 а) нормальные напряжения; б) относительные деформации

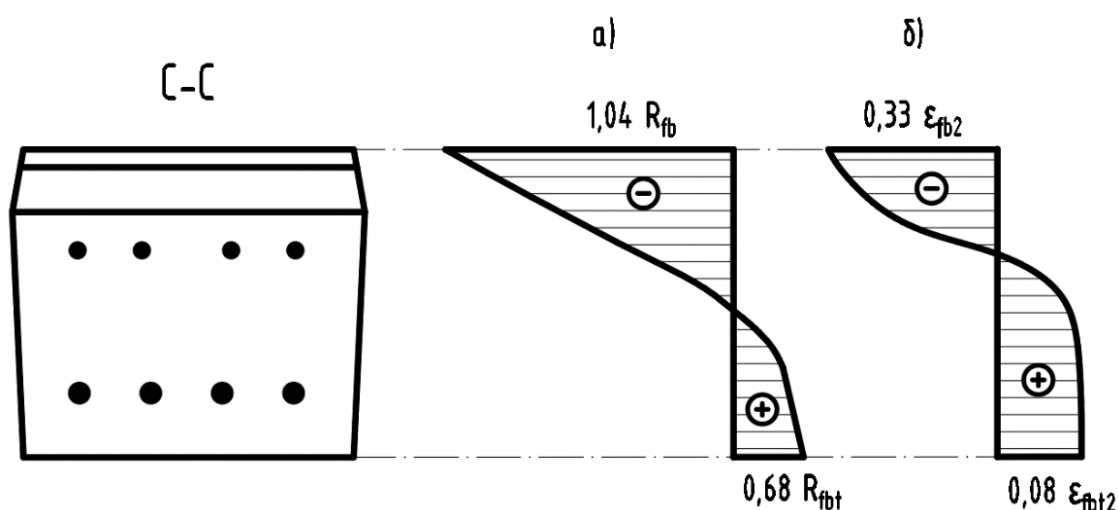


Рисунок 11 - Эпюры напряжений и деформаций по оси X в поперечном сечении C-C:  
 а) нормальные напряжения; б) относительные деформации

В работе [31] было предположено, что под площадкой нагружения образуется клин уплотнения (рис. 5 и 7), который раскалывает бетон под пластиной. Сопротивление элемента сопровождается образованием клина (см. рис. 10), который появляется под стальной пластиной пресса из-за наличия сил трения между элементами. На гранях клина образуются нормальные и касательные напряжения, которые растут при увеличении нагрузки. Бетон в данном случае работает на срез (по грани клина) и скол (из-за возникновения растягивающих напряжений  $R_{bt}$ ). Как видно из результатов данного исследования, сталефибробетонная полушпала сопротивляется также с образованием клина под площадкой загрузки.

На рис. 3–5 можно заметить образование и раскрытие первых нормальных трещин происходит по оси нагружения согласно модели [31, 37] от раскалывания бетона по вертикальной плоскости В-Д между вершиной клина и основанием полушпалы от растягивающих напряжений (см. рис.10 а).

После появления нормальной трещины по оси загрузки сечение полушпалы делится на 2 условные части, разделенные трещиной, которые продолжают сопротивляться по отдельности согласно модели [31, 37] (см. рис.10 б). Образование и раскрытие 2-ой и 3-ей наклонных трещин происходит по вертикальным плоскостям  $E_1-E_2$  и  $E_3-E_4$  от раскалывания бетона. Площадка нагружения имеет отклонение от горизонтали из-за формы полушпалы, поэтому нормальные трещины имеют некоторый наклон к основанию полушпалы.

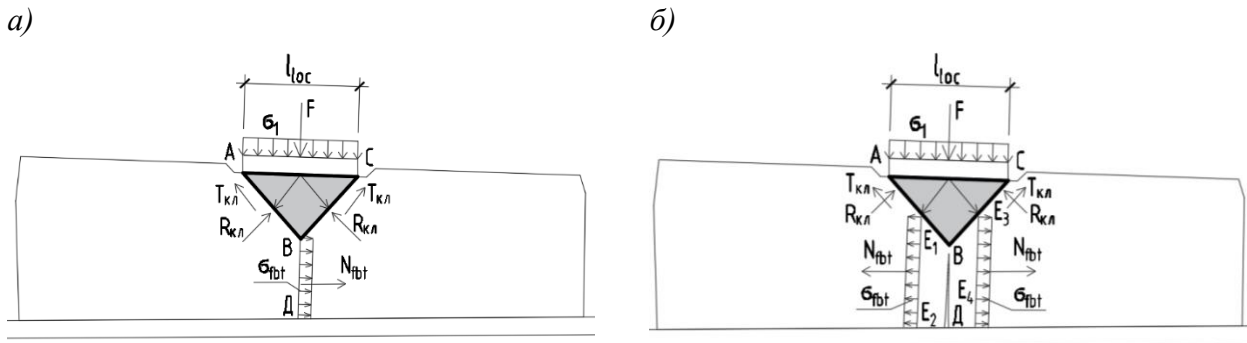


Рисунок 12 - Модель сопротивления сталефибробетонной полушпалы с образованием клина: а) до появления нормальной трещины; б) после появления нормальной трещины

Погрешность несущей способности железобетонной полушпалы между экспериментальным и численным исследованиям составляет:

$$\Delta = (P_{ult1} - P_{ult2}) / P_{ult1} \times 100\% = (236,33 - 217,55) / 236,33 \times 100\% = 7,9\% \quad (1)$$

Расхождение между полученными результатами составило менее 10%, данный результат можно считать удовлетворительным.

Сравнение результатов исследований сталефибробетонной и железобетонной полушпалы [31] для удобства приведено в табличной форме (см. табл. 7).

Таблица 7 - Сравнение результатов исследований

Исследуемый фактор	Железобетонная полушпала	Сталефибро бетонная полушпала	Ед. изм.	Разница значений, %
Несущая способность	79.33	236.33	т	198
Нагрузка трещинообразования (нормальные трещины)	7.5	30	т	300
Нагрузка трещинообразования (наклонные трещины)	13.25	103.33	т	679
Максимальные нормальные сжимающие напряжения в бетоне/сталефибробетоне	43.6	86.65	МПа	98.7
Максимальные нормальные растягивающие напряжения в бетоне/сталефибробетоне	2.237	8.53	МПа	281
Максимальные нормальные напряжения в продольной арматуре	95.62	301.62	МПа	215.4

#### 4. Заключение

1. Анализ напряженно-деформированного состояния и характер разрушения сталефибробетонных полушпал показал, что добавление стальной фибры привело к увеличению сопротивлению сжимающей нагрузке, увеличению несущей способности и трещиностойкости данных конструкций.

2. Несущая способность сталефибробетонной полушпалы увеличилась на 198%.

3. Сопротивление образованию нормальных и наклонных трещин сталефибробетонной полушпалы, а также их раскрытие выросло на 300% и 679% соответственно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чурсанова И.А., Емельянова Г.А. Применение конструкции пути сниженной вибрации в России // Проблемы науки. 2023. № 4. С. 51-56. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54795730>
2. Гешка А., Лаборенц П. Резиноармированная железобетонная полушпала для метрополитена: пат. RU186427U1 № 2018140003; заявл. 2018. [https://yandex.ru/patents/doc/RU186427U1\\_20190121?ysclid=meahryy9a559042449](https://yandex.ru/patents/doc/RU186427U1_20190121?ysclid=meahryy9a559042449)
3. Цинле Х., Цай Ч., Чжу Ш., Цзявэй Чж., Чжай В. Динамические характеристики бесстыкового пути с низким уровнем вибрации на совместной высокоскоростной пассажирской и грузовой железной дороге // Транспорт. 2018. Т. 33. С. 669-678. <https://doi.org/10.3846/16484142.2018.1457569>
4. Чжиу Ю., Ин С., Чжи С., Сяо Л. Усталостные характеристики бесстыковой пути конструкции типа CRTS III под нагрузкой от высокоскоростного поезда на основе закона конститутивного повреждения бетона при усталости // Современные бетонные технологии. 2018. Т. 16. С. 233-249. <https://doi.org/10.3151/jact.16.233>
5. Го В., Цзэн З., Ли С., Ван В., Шуайбу А.А., Чэнь З. Экспериментальное исследование механических свойств тяжеловесного пути с низкой вибрацией под статической нагрузкой поезда // Научный прогресс и исследования. 2020. Т. 103. <https://doi.org/10.1177/0036850420927249>
6. Цзайвэй Л., Сяочжоу Л., Хунъюэ Л., Юэлэй Х., Юньлай Чж. Обнаружение поверхностных трещин в предварительно изготовленных плитах пути для высокоскоростного рельсового транспорта с помощью инфракрасной термографии // Материалы. 2020. Т. 13. <https://doi.org/10.3390/ma13214837>
7. Хэ Ю., Шэнь Ц., Ли Чж., Лу Х. Фрактальные характеристики распространения поперечных трещин в плитах пути типа CRTS II // Математические задачи в инженерии. 2019. Т. 10. С. 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/6587343>
8. Чжан Л., Ли Чж., Ма Х. Исследование параметрических характеристик модели Муни-Ривлина для резины // Шум и вибрация: материалы конференции и выставки. 2018. Т. 38. С. 427-430. <https://doi.org/10.4261/2018-01-11250>
9. Сяоан Л., Цзявэй Ш., Ихун О., Вэньбинь Я.С. Идентификация параметров модели Муни-Ривлина для резинового амортизатора на основе суррогатной модели // Шум и вибрация: материалы конференции и выставки. 2023. Т. 13. <https://doi.org/10.4271/2023-01-1150>
10. Цзэн З., Ху Г., Хуан С., Ван В., Кахтан А.А.С., Шуайбу А.А., Ван Ц. Статические характеристики пути с низкой вибрацией для тяжеловесных железных дорог при различных условиях нагружения с использованием метода конечных элементов // Научный прогресс. 2021. Т. 104. С. 1-19. <https://doi.org/10.4271/2023-01-1150>
11. Юй Чж., Се Ю., Се Ю., Ли С. Усталостные характеристики бесстыковой пути конструкции типа CRTS III под нагрузкой от высокоскоростного поезда на основе закона конститутивного повреждения бетона при усталости // Современные бетонные технологии. 2018. Т. 16. С. 233-249. <https://doi.org/10.3151/jact.16.233>
12. Чжипин Чж., Сяньфэн Х., Сяньфэн Х., Куньтэн Чж. Экспериментальное исследование механических характеристик плиты пути CRTS II под вертикальной нагрузкой от поезда // Железнодорожная наука и инженерия. 2015. Т. 40. <https://doi.org/10.2991/icache-15.2015.96>
13. Боян М., Жарко П., Марина М., Слободан Р. Механические характеристики самоуплотняющегося бетона, изготовленного с крупным заполнителем, полученным при переработке сборных железобетонных элементов // Румынский журнал материалов. 2016. Т. 46. С. 167-174. [https://www.researchgate.net/publication/305320567\\_Mechanical\\_characteristics\\_of\\_self-compacting\\_concrete\\_made\\_with\\_coarse\\_aggregate\\_obtained\\_from\\_concrete\\_prefabricated\\_elements\\_recycling](https://www.researchgate.net/publication/305320567_Mechanical_characteristics_of_self-compacting_concrete_made_with_coarse_aggregate_obtained_from_concrete_prefabricated_elements_recycling)
14. Куньтэн Чж., Чжипин Чж., Бинь В., Бинь Л. Исследование основных механических характеристик бесстыкового пути типа CRTS III // Международная конференция по мехатронике, электронике, промышленности и управлению (MEIC 2015). 2015. <https://doi.org/10.2991/meic-15.2015.338>
15. Цзюнь Л., Шэньян Чж., Ваньмин Чж. Передовая пространственно-связанная модель динамики системы «поезд-плита»: теоретические методы и численные приложения // Звук и вибрация. 2021. Т. 501. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116059>
16. Ван В.Дж., Го Х.М., Ду Х., Го Ц., Лю Ц.Ю., Чжу М.Х. Исследование механизма повреждения и предотвращения повреждений рельсов на тяжеловесных железных дорогах // Анализ инженерных отказов. 2013. Т. 35. С. 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.033>
17. Ваньмин Чж., Цзяньминь Г., Пэнфэй Л., Кайюнь В. Снижение бокового износа рельсов на кривых участках тяжеловесных железных дорог на основе динамического взаимодействия колеса и рельса // Международный журнал динамики транспортных систем. 2014. Т. 52. С. 440-454. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.906633>
18. Чжипин Чж., Ван Ц., Шэнь Ш., Пин Л., Шуайбу А.А., Ван В. Экспериментальное исследование эволюции механических свойств бесстыкового пути типа CRTS III под усталостной нагрузкой // Строительные материалы. 2019. Т. 210. С. 639-649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.080>
19. Чжун В., Ху Ц., Шэнь П., Ван Ч., Лю Ц. Экспериментальное исследование связи между усталостью при контактном нагружении и износом рельсов для высокоскоростных и тяжеловесных железных дорог и выбор материала рельса // Износ. 2011. Т. 271. С. 2485–2493. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.053>
20. Цзэн З., Сяо Ю., Ван В., Хуан Чж., Вэй В., Худу Ш.Б. Исследование динамических характеристик бесстыкового пути типа CRTSIII в условиях длительной эксплуатации // Материалы. 2022. Т. 15. <https://doi.org/10.3390/ma15062033>

21. Цай Ч., Сюй П. Динамическое оптимизационное проектирование структурных параметров пути с низкой вибрацией // Железные дороги Китая. 2011. Т. 33. С. 73–79. <https://doi.org/10.3846/16484142.2018.1457569>
22. Цзэн З., Пэн Г., Го В., Хуан С., Ван В., Ху Ц., Ли С., Шуайбу А.А., Юань Ю., Ду Х. Исследование механических характеристик усовершенствованного пути с низкой вибрацией и анализ его применимости для тяжеловесных железных дорог // Прикладные науки. 2021. Т. 11. С. 10232. <https://doi.org/10.3390/app112110232>
23. Цзэн З., Ван Ц., Инь Х., Шэнь Ш., Шуайбу А.А., Ван В. Экспериментальное исследование виброгасящих характеристик оптимизированного пути с низкой вибрацией для тяжеловесных железных дорог // Удар и вибрация. 2019. Т. 3. С. 1–17. <https://doi.org/10.1155/2019/1539564>
24. ГОСТ 33320-2015. Шпалы железобетонные для железных дорог. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. <https://docs.cntd.ru/document/1200124225>
25. Зыков Ю. Шпала композитобетонная: пат. RU177753U1 № 2017139725; заявл. 2017. [https://yandex.ru/patents/doc/RU177753U1\\_20180312](https://yandex.ru/patents/doc/RU177753U1_20180312)
26. Байчорова, А. А. Исследование напряженно деформированного состояния полушпалы метрополитена из базальтового бетона / А. А. Байчорова, Д. С. Ноздрин, М. Харун // Системные технологии. – 2023. – № 3(48). – С. 54–61. [https://doi.org/10.55287/22275398\\_2023\\_3\\_54](https://doi.org/10.55287/22275398_2023_3_54)
27. Леонович, И. А. Влияние упругих характеристик композитного материала на свойства фибробетона / И. А. Леонович, А. А. Леонович // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2007. – № 3(16). – С. 148–155. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-uprugih-harakteristik-kompozitnogo-materiala-na-svoystva-fibrobeta>
28. Жаворонков, М. И. Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона / М. И. Жаворонков // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 3(33). – С. 114–120. <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-harakteristik-razrusheniya-i-modulya-uprugosti-fibrobeta>
29. Ю. В. Пухаренко. Прочность и деформативность полиармированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, В. И. Морозов, У. Х. Магдеев // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 1. – С. 107–111. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25576066>
30. Е. М. Щербань. Влияние вида заполнителя и дисперсного армирования на деформативность виброцентрифугированных бетонов / Е. М. Щербань, С. А. Стельмах, М. Г. Холодняк [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2018. – Т. 10, № 5. – С. 72. – EDN YTRWNF. <https://esj.today/PDF/51SAVN518.pdf>
31. Мирсаяпов Илшат Т., Павлов М.Н., Хайруллин Р.Р., Мирсаяпов А.И., Исследование напряженно-деформированного состояния полушпал для метрополитена // Известия КГАСУ, No 2(72), с. 108–123. [https://izvestija.kgasu.ru/ru/nomera-zhurnal/arkhiv-zhurnal?sod=sod2\\_2025&idizv=18](https://izvestija.kgasu.ru/ru/nomera-zhurnal/arkhiv-zhurnal?sod=sod2_2025&idizv=18)
32. Мирсаяпов И.Т., Рахимов М., Хорев Н., Хорьков Е., Лим В. Арматурный каркас железобетонной полушпалы для метрополитена: пат. RU230832U1 № 2024110369; заявл. 2024. <https://elibrary.ru/item.asp?id=76433464>
33. Мирсаяпов, И. Т. Численный анализ нелинейного поведения железобетонных конструкций на твердотельных моделях / И. Т. Мирсаяпов, Г. Т. Апхадзе, В. Д. Симаков. – Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – 211 с. <https://st.kgasu.ru/iblock/536/p6bqjc2w8hcyr8vcaa2bposov8gj97qi/Monografiya.-CHislennyy-analiz-nelineynogo-povedeniya-zhelezobetonnykh-konstruktsiy-na-tverdotelnykh-modelyakh.pdf>
34. СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. М., 2017. <https://docs.cntd.ru/document/550566433>
35. Дмитриев А., Новижилев И., Михалюк Д., Лалин В. Калибровка и валидация конститутивной модели Менетри-Вильяма для бетона // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2020. № 88. <https://doi.org/10.18720/CUBS.88.4>
36. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М., 2018. <https://docs.cntd.ru/document/554403082>
37. Мирсаяпов И., Антаков А., Павлов М. Моделирование работы кирпичной кладки при сжатии // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2024. № 113. <https://doi.org/10.4123/CUBS.113.8>

## REFERENCES

1. Chursanova I.A. and Yemelyanova G.A. (2023) Application of the design of the path of reduced vibration in Russia. *Journal of Problems of Science*, 4, 51–56. <https://elibrary.ru/item.asp?id=54795730>
2. Geshka A. and Laborenz P. (2019) Rubber cover reinforced concrete half-sleepers for the subway. *Patent* RU186427U1, No. 2018140003. [https://yandex.ru/patents/doc/RU186427U1\\_20190121?ysclid=meahryy9a559042449](https://yandex.ru/patents/doc/RU186427U1_20190121?ysclid=meahryy9a559042449)
3. Qinglie H., Cai C., Zhu S., Jiawei Z. and Zhai W. (2018) Dynamic performance of low vibration slab track on shared high-speed passenger and freight railway. *Journal of Transport*, 33, 669–678. <https://doi.org/10.3846/16484142.2018.1457569>
4. Zhiwu Y., Ying X., Zhi S. and Xiao L. (2018) Fatigue Performance of CRTS III Slab Ballastless Track Structure under High-speed Train Load Based on Concrete Fatigue Damage Constitutive Law. *Journal of Advanced Concrete Technlpgy*, 16, 233–249. <https://doi.org/10.3151/jact.16.233>

5. Guo W., Zeng Z., Li S., Wang W., Shuaibu A.A., and Chen Z. (2020) Experimental study on mechanical properties of heavy-haul low-vibration track under train static load. *Journal of Scientific Progress & Research*, 103. <https://doi.org/10.1177/0036850420927249>
6. Zai-Wei L., Xiao-Zhou L., Hong-Yao L., Yue-Lei H. and Yun-Lai Z. (2020) Surface Crack Detection in Precasted Slab Track in High-Speed Rail via Infrared Thermography. *Journal of Materials*, 13. <https://doi.org/10.3390/ma13214837>
7. He Y., Shen J., Li Z., and Lu H. (2019) Fractal Characteristics of Transverse Crack Propagation on CRTSII Type Track Slab. *Journal of Mathematical Problems in Engineering*, 10, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2019/6587343>
8. Zhang L, Li Z. and Ma X. (2018) Study on parameter characteristics of rubber Mooney-Rivlin model. *Journal of Noise and Vibration Conference & Exhibition*, 38, 427-430. <https://doi.org/10.4261/2018-01-11250>
9. Xiao-Ang L., Jiawei S., Yi-Hong O. and Yang Wen-Bin S. (2023) Parameters Identification of Mooney-Rivlin Model for Rubber Mount Based on Surrogate Model. *Journal of Noise and Vibration Conference & Exhibition*, 13. <https://doi.org/10.4271/2023-01-1150>
10. Zeng Z., Hu G., Huang X., Wang W., Qahtan A.A.S., Shuaibu A.A. and Wang J. (2021) Statics performance of heavy-haul railway low-vibration track (LVT) under varying loading condition with the finite element method. *Journal of Science Progress*, 104, 1-19. <https://doi.org/10.1177/00368504211036330>
11. Yu Z., Xie Y., Xie Y. and Li X. (2018) Fatigue performance of CRTS III slab ballastless track structure under high speed train load based on concrete fatigue damage constitutive law. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 16, 233-249. <https://doi.org/10.3151/jact.16.233>
12. Zhiping Z., Xianfeng H., Xianfeng H. and Kunteng Z. (2015) Experimental study on mechanical characteristics of CRTS II slab track under the vertical load of train. *Journal of Railway Science and Engineering*, 40. <https://doi.org/10.2991/icache-15.2015.96>
13. Bojan M., Zarko P., Marina M. and Slobodan R. (2016) Mechanical characteristics of self-compacting concrete made with coarse aggregate obtained from concrete prefabricated elements recycling. *Romanian journal of materials*, 46, 167-174. [https://www.researchgate.net/publication/305320567\\_Mechanical\\_characteristics\\_of\\_self-compacting\\_concrete\\_made\\_with\\_coarse\\_aggregate\\_obtained\\_from\\_concrete\\_prefabricated\\_elements\\_recycling](https://www.researchgate.net/publication/305320567_Mechanical_characteristics_of_self-compacting_concrete_made_with_coarse_aggregate_obtained_from_concrete_prefabricated_elements_recycling)
14. Kunteng Z., Zhiping Z., Bin W. and Bin L. (2015) Study on the basic mechanical characteristics of CRTS III slab ballastless track. *International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering (MEIC 2015)*. <https://doi.org/10.2991/meic-15.2015.338>
15. Jun L., Shengyang Z. and Wanming Z. (2021) An advanced train-slab track spatially coupled dynamics model: Theoretical methodologies and numerical applications. *Journal of Sound and Vibration*, 501. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116059>
16. Wang W. J., Guo H. M., Du X., Guo J., Liu Q. Y. and Zhu M. H. (2013). Investigation on the damage mechanism and prevention of heavy-haul railway rail. *Journal of Engineering Failure Analysis*, 35, 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.033>
17. Wanming Z., Jianmin G., Pengfei L. and Kaiyun W. (2014) Reducing rail side wear on heavy-haul railway curves based on wheel–rail dynamic interaction. *International Journal of Vehicle System Dynamics*, 52, 440-454. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.906633>
18. Zhi-ping Z., Wang J., Shen S., Ping L., Shuaibu A.A. and Wang W. (2019) Experimental study on evolution of mechanical properties of CRTS III ballastless slab track under fatigue load. *Journal of Construction and Building Materials*, 210, 639-649. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.080>
19. Zhong W., Hu J. J., Shen P., Wang C. Y. and Lius Q. Y. (2011). Experimental investigation between rolling contact fatigue and wear of high-speed and heavy-haul railway and selection of rail material. *Journal of Wear*, 271, 2485–2493. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.12.053>
20. Zeng Z., Xiao Y., Wang W., Huang Z., Wei W. and Houdou S.B. (2022) Research on Dynamic Performance of CRTSIII Type Slab Ballastless Track under Long-Term Service. *Journal of Materials*, 15. <https://doi.org/10.3390/ma15062033>
21. Cai C., Xu P. (2011) Dynamic optimization design of the structural parameters of low vibration track. *Journal of China Railway*, 33, 73–79. <https://doi.org/10.3846/16484142.2018.1457569>
22. Zeng Z., Peng G., Guo W., Huang X., Wang W., Hu J., Li S., Shuaibu A.A., Yuan Y. and Du X. (2021) Research on Mechanical Performance of Improved Low Vibration Track and Its Feasibility Analysis for Heavy-Haul Railway Applications. *Journal of Applied Sciences*, 11, 10232. <https://doi.org/10.3390/app112110232>
23. Zeng Z., Wang J., Yin H., Shen S.G., Shuaibu A.A. and Wang W. (2019) Experimental Investigation on the Vibration Reduction Characteristics of an Optimized Heavy-Haul Railway Low-Vibration Track. *Journal of Shock and Vibration*, 3, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2019/1539564>
24. Russian state standard GOST 33320-2015. (2015) Ferroconcrete cross ties for railways. General specifications. <https://docs.cntd.ru/document/1200124225>
25. Zykov Y. (2018) Composite concrete trope. *Patent RU177753U1, No. 2017139725*. [https://yandex.ru/patents/doc/RU177753U1\\_20180312](https://yandex.ru/patents/doc/RU177753U1_20180312)
26. Baychorova A. A., Nozdrin D. S. and Mahmud H. (2023) Investigation of the stressed and deformed state of basalt concrete metropoliten half-trees. *Journal of System Technologies*, 3, 54-61. [https://doi.org/10.55287/22275398\\_2023\\_3\\_54](https://doi.org/10.55287/22275398_2023_3_54)

27. Leonovich I. A., Leonovich A. A. (2007) Influence of the elastic characteristics of a composite material on the properties of fiber concrete. *Journal of Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 3. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-uprugih-harakteristik-kompozitnogo-materiala-na-svoystva-fibrobetona>
28. Zhavoronkov M. I. (2015) Determination of the Fracture Characteristics and the Elastic Modulus of Fiber Concrete. *Journal of Izvestiya KGASU*, 3. <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-harakteristik-razrusheniya-i-modulya-uprugosti-fibrobetona>
29. Pukhareno Yu. V., Panteleev D. A., Morozov V. I. and Magdeev U. Kh. (2016) Strength and Deformability of Polyreinforced Fiberglass Concrete Using Amorphous Metal Fiber. *Journal of Architecture and Construction*, 1, 107-111. <https://elibrary.ru/item.asp?id=25576066>
30. Shcherban E.M., Stelmakh S.A., Kholodnyak M.G., Nazhnev M.P., Rymova E.M. and Liev R.A. (2018) Influence of the type of aggregate and dispersed reinforcement on the deformability of vibrocentrifuged concrete. *The Eurasian Scientific Journal*, 5. <https://esj.today/PDF/51SAVN518.pdf>
31. Mirsayapov Ilshat T., Pavlov M.N., Khairullin R.R. and Mirsayapov A.I. (2025) Resistance of a stress-strain state of a half a step of the low vibration track. *Journal of Izvestiya KGASU*, 72, 10-10. [https://izvestija.kgasu.ru/ru/nomera-zhurnal/arkhiv-zhurnal?sod=sod2\\_2025&idzv=18](https://izvestija.kgasu.ru/ru/nomera-zhurnal/arkhiv-zhurnal?sod=sod2_2025&idzv=18)
32. Mirsayapov Ilshat T., Rakhimov M., Khorev N., Khorkov E. and Lim V. (2024) Reinforcement frame of a reinforced concrete half-sleeper for the metro. *Patent RU230832U1*, No. 2024110369. <https://elibrary.ru/item.asp?id=76433464>
33. Mirsayapov, Ilshat T., Apzadze G., Simakov V. (2023) Numerical analysis of nonlinear behavior of reinforced concrete structures on solid-state models: a monograph. *Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; Kazan State University of Architecture and Civil Engineering Kazan: KGASU Publishing House*, 207. <https://st.kgasu.ru/iblock/536/p6bqjc2w8hcyr8vcaa2bposov8gj97qi/Monografiya.-CHislenyy-analiz-nelineynogo-povedeniya-zhelezobetonnykh-konstruktsiy-na-tverdotelnykh-modelyakh.pdf>
34. Russian set of rules SP 360.1325800.2017/ (2017) Steel fiber reinforced concrete structures. Design rules. <https://docs.cntd.ru/document/550566433>
35. Dmitriev, A., Novozhilov, I., Mikhaliuk, D., and Lalin, V. (2020) Calibration and validation of the Menetrey-Willam constitutive model for concrete. *Journal of Construction of Unique Buildings and Structures*, 88. <https://doi.org/10.18720/CUBS.88.4>
36. Russian set of rules SP 63.13330.2018. (2018) Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. <https://docs.cntd.ru/document/554403082>
37. Mirsayapov I., Antakov A., Pavlov M. (2024) Modeling the work of brickwork under compression. *Journal of Construction of Unique Buildings and Structures*, 113. <https://doi.org/10.4123/CUBS.113.8>

#### Информация об авторах

**Илшат Талгатович Мирсайпов**, ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Российская Федерация, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций.

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

**Максим Николаевич Павлов**, ФГБОУ ВПО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», г. Казань, Российская Федерация, аспирант.

E-mail: [pavlov.m.n@bk.ru](mailto:pavlov.m.n@bk.ru)

#### Information about authors

**Ilshat T. Mirsayapov**, «Kazan State University of Architecture and Civil Engineering», Kazan, Russian Federation, doctor of technical sciences, associate professor, head of the department of reinforced concrete and masonry structures.

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

**Maksim N. Pavlov**, «Kazan State University of Architecture and Civil Engineering», Kazan, Russian Federation, postgraduate student.

E-mail: [pavlov.m.n@bk.ru](mailto:pavlov.m.n@bk.ru)

Статья поступила в редакцию 25.10.2025  
Одобрена после рецензирования 05.02.2026  
Принята к публикации 13.02.2026

The article was submitted 25.10.2025  
Approved after reviewing 05.02.2026  
Accepted for publication 13.02.2026

С.Г. САИЯН<sup>1,2</sup>, А.В. ВАСИЛЬЕВ<sup>3</sup><sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Российская Федерация<sup>2</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук; г. Москва, Российская Федерация<sup>3</sup> Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

## ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОТ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО БАРЬЕРА В ВИДЕ НАЗЕМНОГО ЖИДКОСТНОГО РЕЗЕРВУАРА

*Аннотация.* Предложен подход к территориальной защите зданий и сооружений от поверхностных сейсмических волн на основе сейсмического барьера в виде наземного жидкостного резервуара, размещенного на поверхности упругого полупространства. Разработана математическая модель взаимодействия поверхностных волн с сейсмическим барьером с учетом условий контакта на границе раздела сред и слабой сжимаемости жидкости. Получено дисперсионное соотношение для волн Рэлея под жидкостным слоем конечной высоты, корректно переходящее к классическим предельным случаям отсутствия жидкости, бесконечной глубины и несжимаемой жидкости. Для барьера конечной длины на основе условий непрерывности на боковых границах выведена передаточная функция  $T_R$  рэлеевской волны и предложены аналитические приближения. Выявлены резонансы  $kL = n\pi$ , соответствующие отсутствию ослабления, и зоны экспоненциального подавления между ними, величина которого определяется параметром  $\alpha_f$ , пропорциональным добавочной массе жидкости и зависящим от отношения скоростей. Показано, что для SH-волн Лява жидкостный барьер не создает сдвиговой жесткости и не приводит к затуханию, что требует альтернативных решений по территориальной сейсмической защите. Приведены изополя передаточной функции, позволяющие на этапе предварительного проектирования выбирать высоту и протяженность резервуара для достижения заданного уровня ослабления рэлеевских волн.

*Ключевые слова:* поверхностные волны, волны Рэлея, волны Лява, сейсмический барьер, сейсмическая защита, жидкостный резервуар.

S.G. SAIYAN<sup>1,2</sup>, A.V. VASILIEV<sup>3</sup><sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation<sup>2</sup> Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences; Moscow, Russian Federation<sup>3</sup> Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University); Moscow, Russian Federation

## AREA-WIDE PROTECTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES FROM SURFACE WAVES USING A SEISMIC BARRIER IMPLEMENTED AS AN ABOVE-GROUND LIQUID STORAGE TANK

*Abstract.* An approach is proposed for area-wide protection of buildings and structures from surface seismic waves using a seismic barrier in the form of an above-ground liquid storage tank placed on the surface of an elastic half-space. A mathematical model of the interaction between surface waves and the seismic barrier is developed, accounting for contact conditions at the interface between media and the weak compressibility of the fluid. A dispersion relation is obtained for Rayleigh waves beneath a finite-thickness liquid layer, which correctly reduces to the classical limiting cases of no fluid, infinite depth, and an incompressible fluid. For a barrier of finite length, based on continuity conditions at the lateral boundaries, the Rayleigh-wave transfer function  $T_R$  is derived and analytical approximations are proposed. Resonances  $kL = n\pi$ , corresponding to no attenuation, are identified, along with zones of exponential suppression between them; the magnitude of the suppression is governed by a parameter  $\alpha_f$ , proportional to the added mass of the fluid and dependent on the ratio of velocities. It is shown that for

*Love (SH) waves the liquid barrier provides no shear stiffness and does not produce attenuation, necessitating alternative solutions for area-wide seismic protection. Contour plots of the transfer function are presented to support preliminary design choices of the tank height and length needed to achieve a specified level of Rayleigh-wave attenuation.*

**Keywords:** *surface waves, Rayleigh waves, Love waves, seismic barrier, seismic protection, liquid reservoir.*

## 1. Введение

Поверхностные сейсмические волны (прежде всего волны Рэлея и Лява) формируют доминирующую долю колебательной энергии в приповерхностной зоне и часто определяют интенсивность сейсмического воздействия на здания и сооружения. Вблизи поверхности их амплитуды убывают с глубиной лишь на масштабе длины волны, поэтому локальные инженерные решения, изменяющие граничные условия и/или эффективные инерционные свойства поверхности, способны заметно влиять на их распространение [1, 2]. На этом фоне продолжается активный поиск инженерных решений, позволяющих целенаправленно модифицировать поверхностное волновое поле.

В классической инженерной практике территориальной сейсмо- и виброзащиты для ослабления поверхностных волн используют открытые траншеи [3], ряды защитных свай [4-6], подпорные стены, рельефные валы, метаматериальные периодические структуры [7, 8] и т.д. [9, 10]. Наряду с описанными решениями, особый интерес представляет сейсмический барьер на основе наземного жидкостного резервуара, при котором слой жидкости конечной высоты  $H$  и длины  $L$  размещен непосредственно на поверхности упругого полупространства. Такая конфигурация технологична, масштабируема и потенциально совмещается с водохозяйственными или противопожарными нуждами площадки.

Подобные концепции описывались в работах [11-17]. В указанных исследованиях, как правило, анализируются дисперсионные соотношения поверхностных и интерфейсных волн на границе жидкостных и упругих слоев [11, 13, 14], а также на границе жидкости и пористых сред [12, 15], а в более поздних работах рассматриваются метаматериальные барьеры с жидкостными резонаторами для ослабления рэлеевских волн [16, 17]. В отличие от этих исследований, в данной статье впервые задача для системы «упругое полупространство – жидкостный резервуар» переводится из класса анализа дисперсионных моделей для поверхностных волн в прикладную задачу территориальной защиты от передачи колебаний через конечный наземный резервуар и, кроме того, получены аналитические формулы для определения зависимости переданной амплитуды рэлеевской волны от параметров сейсмического барьера и упругого полупространства.

Таким образом, формируется цель и практическая значимость данного исследования – обосновать и количественно оценить эффективность наземного жидкостного резервуара как сейсмического барьера для подавления поверхностных сейсмических волн. Научная новизна данного исследования заключена в разработке математической модели для расчета прохождения поверхностных сейсмических волн через наземный жидкостный резервуар конечной высоты и длины, а также в получении замкнуты приближений для переданной амплитуды рэлеевской волны.

## 2. Модели и методы

На рисунке 1 изображена расчетная схема сейсмического барьера в виде наземного жидкостного резервуара. На поверхности упругого полупространства ( $z=0$ ) расположен жидкостный слой (жидкостный резервуар) конечной высоты  $H$  и длины  $L$ . На свободной поверхности возбуждаются поверхностные волны (в работе рассматриваются рэлеевские волны и волны Лява), которые частично подавляются и частично проходят через жидкостный слой. Ставится задача определения дисперсии поверхностных волн, проходящих через жидкостный резервуар конечных размеров, а также определения зависимости переданной

амплитуды рэлеевской волны (передаточной функции рэлеевской волны)  $T_R$  от параметров сейсмического барьера.

Основные используемые гипотезы заключены в линеаризованной постановке (пренебрежение нелинейными эффектами и вязкостью воды, что оправдано при низких частотах и малых градиентах), двумерной постановке задачи, а также в рассмотрении поверхностных волн как совокупности гармонических воздействий.

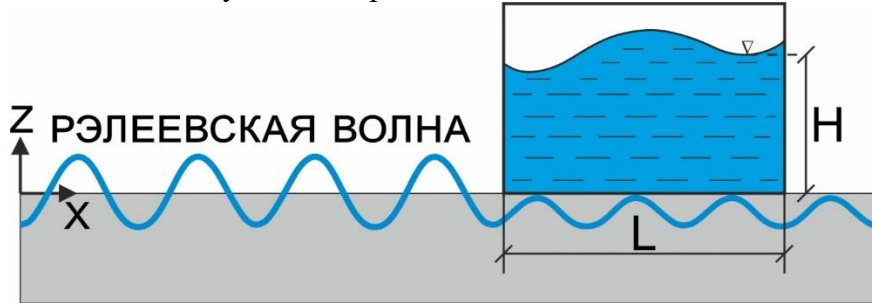


Рисунок 1 – Расчетная схема сейсмического барьера в виде наземного жидкостного резервуара

Упругое полупространство ( $z < 0$ ). Для упругого полупространства поле перемещений  $\mathbf{u}(x, z, t)$  удовлетворяет изотропной линейно-упругой среде уравнения движения:

$$\rho_s \ddot{\mathbf{u}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}, \quad (1)$$

и связью между напряжениями и деформациями:

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda_s (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} + 2\mu_s \boldsymbol{\varepsilon}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (2)$$

Введем скалярный и векторный потенциалы Гельмгольца:

$$\mathbf{u} = \nabla \varphi + \nabla \times (\psi \mathbf{e}_y) = (\partial_x \varphi - \partial_z \psi; 0; \partial_z \varphi + \partial_x \psi) \quad (3)$$

Подстановка (3) в (1) дает два несвязанных волновых уравнения:

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0; \quad \nabla^2 \psi - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0, \quad (4)$$

где  $c_p = \sqrt{\frac{\lambda_s + 2\mu_s}{\rho_s}}$  и  $c_s = \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho_s}}$  – скорости распространения P- и S-волн.

Рэлеевские волны включают в себя как  $\varphi$ , так и  $\psi$ , тогда как волны Лява включают в себя только движение вне плоскости.

Жидкостный резервуар ( $0 < z < H$ ). Рассмотрим жидкостный резервуар как однородную, слабосжимаемую невязкую жидкость с плотностью  $\rho_f$ . Поскольку частота поверхностных волн обычно ниже нескольких десятков Гц [18-20], а затухание в воде пренебрежимо мало, то вязкость можно игнорировать. Пусть  $p(x, z, t)$  – давление, а  $\mathbf{U}(x, z, t)$  – скорость. Линеаризованные уравнения непрерывности и импульса:

$$\rho_f \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla p = 0; \quad \frac{1}{K_f} \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (5)$$

где  $K_f$  – объемный модуль упругости.

Взяв дивергенцию и исключив  $\mathbf{U}(x, z, t)$ , получим уравнение акустической волны:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_f^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (6)$$

где  $c_f = \sqrt{\frac{K_f}{\rho_f}}$ .

Поскольку вода не способна воспринимать касательные (сдвиговые) напряжения, в ней возникают лишь дилатационные движения. Это принципиально влияет на связь со смешанно-поляризованными волнами Рэлея, но практически не затрагивает SH-волны Лява, поскольку взаимодействуют с жидкостью лишь через измененные граничные условия.

Скорость звука в жидкости  $c_f$  велика, но представляет собой конечную величину. Формально переходя к пределу несжимаемости  $c_f \rightarrow \infty$ , волновое уравнение для потенциала перемещения для жидкости  $\Phi(x, z, t)$  вырождается в уравнение Лапласа  $\nabla^2 \Phi = 0$ . Сохраняя конечное  $c_f$  решение учитывает слабую сжимаемость.

*Граничные условия.* Контакт полупространства (s) и жидкости (f) при  $z=0$ . Непрерывность поля перемещений по нормали:

$$u_z^{(s)}(x, 0, t) = u_z^{(f)}(x, 0, t), \quad (7)$$

Непрерывность нормальных напряжений (жидкость имеет только изотропные компоненты тензора напряжений):

$$\sigma_{zz}^{(s)}(x, 0, t) = -p^{(f)}(x, 0, t), \quad (8)$$

Зануление касательных напряжений:

$$\sigma_{xz}^{(s)}(x, 0, t) = 0 \quad (9)$$

Контакт жидкости и воздуха при  $z=H$  – свободная поверхность:

$$p^{(f)}(x, H, t) = 0, \quad (10)$$

Боковой контакт барьера ( $x=0$  и  $x=L$ ). Среда меняется от жидкостного барьера до земли. На каждом контактном интерфейсе полное поле перемещений и напряжений должно быть непрерывным в пределах  $x=\text{const}$ .

Решение для поверхностных волн Рэлея в полупространстве хорошо известно [1, 21-23]. Использование контакта на боковых поверхностях даст общую матрицу дисперсии.

Для гармонической по времени волны  $e^{-i\omega t}$  и волновым числом  $k = \frac{\omega}{c_R}$  потенциалы

равны:

$$\varphi(x, z) = A e^{ikx} e^{\gamma_p z}; \quad \psi(x, z) = B e^{ikx} e^{\gamma_s z}, \quad (11)$$

где эванесцентные факторы удовлетворяют  $\gamma_p^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{c_p^2}$  и  $\gamma_s^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{c_s^2}$ .

Для поверхностной волны требуется соблюдение условия  $\gamma_p > 0$  и  $\gamma_s > 0$  (затухание с глубиной), что подразумевает  $\omega < \gamma_p k$  и  $\omega < \gamma_s k$ . Компоненты перемещения для полупространства:

$$\begin{aligned} u_x^{(s)} &= \partial_x \varphi - \partial_z \psi = ikA e^{ikx} e^{\gamma_p z} + sB e^{ikx} e^{\gamma_s z}; \\ u_z^{(s)} &= \partial_z \varphi + \partial_x \psi = \gamma_p A e^{ikx} e^{\gamma_p z} + ikB e^{ikx} e^{\gamma_s z}. \end{aligned} \quad (12)$$

Компоненты напряжений могут быть получены, подставив (12) в стандартные уравнения теории упругости. В частности, при  $z=0$ :

$$\begin{aligned}\sigma_{zz}^{(s)}\Big|_{z=0} &= [(\lambda_s + 2\mu_s)\gamma_p^2 - \lambda_s k^2]A + 2i\mu_s k\gamma_s B; \\ \sigma_{xz}^{(s)}\Big|_{z=0} &= 2i\mu_s k 2\gamma_p A + \mu_s (\gamma_s^2 - k^2)B,\end{aligned}\tag{13}$$

поскольку  $\gamma_s^2 - k^2 = -\frac{\omega^2}{c_s^2}$ , то последний член упрощается.

Потенциал для жидкостного резервуара ( $0 < z < H$ ). Используя потенциал  $\Phi(x, z, t)$  для волн с тем же  $k$ :

$$\Phi(x, z) = [C \operatorname{ch}(\gamma_m(z - H)) + D \operatorname{sh}(\gamma_m(z - H))]e^{ikx},\tag{14}$$

где  $\gamma_m^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{c_f^2}$ .

Для несжимаемого случая, если  $c_f \rightarrow \infty$ , то  $\gamma_m = k$ . Вертикальное перемещение жидкости в резервуаре:

$$u_z^{(f)} = \partial_z \Phi = \gamma_m [-C \operatorname{sh}(\gamma_m(z - H)) + D \operatorname{ch}(\gamma_m(z - H))]e^{ikx}.\tag{15}$$

Давление, оказываемое жидкостью на ее границы, является нормальным и определяется линеаризованным соотношением Бернулли  $p = -\rho_f \frac{\partial \Phi}{\partial t}$ . В частотной области оно определяется как  $p = i\omega\rho_f \Phi$ . При  $z=0$  выполняя граничное условие (10) дает при  $p=0 \Rightarrow \Phi(x, H) = Ce^{ikx} = 0 \Rightarrow C=0$ . Тогда:

$$\Phi(x, H) = D \operatorname{sh}(\gamma_m(z - H))e^{ikx}.\tag{16}$$

Итоговые выражения для жидкостного резервуара примут вид:

$$u_z^{(f)}(x, z) = D\gamma_m \operatorname{ch}(\gamma_m(z - H))e^{ikx}, \quad p^{(f)}(x, z) = i\omega\rho_f D \operatorname{sh}(\gamma_m(z - H))e^{ikx}.\tag{17}$$

Условия непрерывности на контактном интерфейсе при  $z=0$ . Применяя условия контакта (7) – (9), а также выражения (12), (13) и (17) получаем следующие условия (сокращая  $e^{ikx}$ ):

- непрерывность нормальных перемещений:

$$\gamma_p A + ikB = D\gamma_m \operatorname{ch}(\gamma_m H);\tag{18}$$

- непрерывность нормальных напряжений:

$$[(\lambda_s + 2\mu_s)\gamma_p^2 - \lambda_s k^2]A + 2i\mu_s k\gamma_s B = i\omega\rho_f D \operatorname{sh}(\gamma_m H);\tag{19}$$

- касательные напряжения:

$$2i\mu_s k\gamma_p A + \mu_s (\gamma_s^2 - k^2)B = 0.\tag{20}$$

Уравнения (18) – (20) образуют однородную линейную систему относительно неизвестных амплитуд  $A$ ,  $B$  и  $D$ . Нетривиальные решения существуют только при условии равенства нулю определителя, что дает дисперсионное уравнение для рэлеевских волн, проходящих через жидкостный барьер.

Дисперсионное уравнение для рэлеевских волн. Запишем систему уравнений в матричной форме  $\mathbf{M}\mathbf{v} = 0$ , где  $\mathbf{v} = (A, B, D)^T$ , а  $\mathbf{M}$  определяется как

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \gamma_p & ik & -\gamma_m \operatorname{ch}(\gamma_m H) \\ (\lambda_s + 2\mu_s)\gamma_p^2 - \lambda_s k^2 & 2i\mu_s k\gamma_s & -i\omega\rho_f \operatorname{sh}(\gamma_m H) \\ 2i\mu_s k\gamma_p & \mu_s (\gamma_s^2 - k^2) & 0 \end{bmatrix}.\tag{21}$$

Дисперсионное соотношение для рэлеевской волны под слоем жидкости конечной высоты  $H$  было получено на основе символического вычисления в Maple:

$$\left[ (\lambda_s + 2\mu_s)\gamma_p^2 - \lambda_s k^2 \right] (\gamma_s^2 - k^2) + 4\mu_s k^2 \gamma_s \gamma_p - \rho_f \omega^2 \gamma_p \left( 1 - \frac{2c_s^2 k^2}{\omega^2} \right) \frac{\text{th}(\gamma_m H)}{\gamma_m} = 0. \quad (22)$$

*Частные случаи.* Приведем некоторые частные случаи с целью проверки аналитического решения и исследования предельных случаев.

При отсутствии жидкостного резервуара ( $\rho_f \rightarrow 0$  или  $H \rightarrow 0$ ), последний член в (22) исчезает, что сводится к известной классической дисперсии рэлеевских волн [23, 24]:

$$\left[ (\lambda_s + 2\mu_s)\gamma_p^2 - \lambda_s k^2 \right] (\gamma_s^2 - k^2) + 4\mu_s k^2 \gamma_s \gamma_p = 0. \quad (23)$$

При бесконечном по высоте резервуаре с жидкостью ( $H \rightarrow \infty$ ), то  $\text{th}(\gamma_m H) \rightarrow 1$ , что приводит к следующему частному случаю:

$$\left[ (\lambda_s + 2\mu_s)\gamma_p^2 - \lambda_s k^2 \right] (\gamma_s^2 - k^2) + 4\mu_s k^2 \gamma_s \gamma_p - \rho_f \omega^2 \gamma_p \left( 1 - \frac{2c_s^2 k^2}{\omega^2} \right) \frac{1}{\gamma_m} = 0. \quad (24)$$

Это классическая дисперсия волны Рэля для полупространства, заполненного бесконечно-глубокой жидкостью, приведенная, например, в книге [23]. Поскольку  $\gamma_m = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c_f^2}}$ , сжимаемость жидкости все еще проявляется явным образом. В пределе для несжимаемой жидкости  $c_f \rightarrow \infty$ , то  $\gamma_m \rightarrow k$ . В таком случае решение упрощается до:

$$\left[ (\lambda_s + 2\mu_s)\gamma_p^2 - \lambda_s k^2 \right] (\gamma_s^2 - k^2) + 4\mu_s k^2 \gamma_s \gamma_p - \rho_f \omega^2 \gamma_p \left( 1 - \frac{2c_s^2 k^2}{\omega^2} \right) \frac{\text{th}(kH)}{k} = 0. \quad (25)$$

На практике произведение  $kH$ , как правило, меньше 10 [23-26], а в дисперсии преобладает добавленный массовый показатель  $\rho_f H$  для  $kH \ll 1$  [26].

Для небольших аргументов разложения функции  $\text{th}(kH)$  в ряд Тейлора при  $kH \ll 1$ :

$\text{th}(kH) \approx kH - \frac{1}{3}(kH)^3 + \dots$ , которое для дисперсионного уравнения принимает следующий вид:

$$\left[ (\lambda_s + 2\mu_s)\gamma_p^2 - \lambda_s k^2 \right] (\gamma_s^2 - k^2) + 4\mu_s k^2 \gamma_s \gamma_p - \rho_f \omega^2 \gamma_p \left( 1 - \frac{2c_s^2 k^2}{\omega^2} \right) H + O[kH^3] = 0. \quad (26)$$

Для уравнения (26) интерпретация такова, что ведущая поправка к Рэлеевской дисперсии линейна по  $H$  и пропорциональна массе воды на единицу длины  $\rho_f H$ . Этот член снижает фазовую скорость рэлеевской волны, поскольку жидкость действует как инерционный слой.

Матрица (21) определяет три собственные вертикальные функции ( $P$ -волна,  $S$ -волна и колебания жидкости). Для жидкостного барьера в виде резервуара конечной длины  $L$  должно выполняться два дополнительных условия – непрерывность полей перемещений при  $x=0$  и  $x=L$ .

Падающая рэлеевская волна единичной амплитуды распространяется в  $+x$  через область  $A$  ( $x < 0$ , определяющая упругое полупространство слева от барьера) и упирается в жидкостный резервуар  $x=0$ . При этом происходит преобразование нескольких режимов колебаний:

- область  $A$  (слева) – отраженная рэлеевская волна ( $R_R$ ), а также отраженные эванесцентные  $P$ - и  $S$ - волны ( $R_p$  и  $R_s$  соответственно);

- область  $B$  (жидкостный резервуар) – 6 собственных решений (3 вертикальные компоненты  $\times$  2 горизонтальных направления распространения);
- область  $C$  (справа) – прошедшая рэлеевская волна ( $T_R$ ), а  $P$ - и  $S$ - волны ( $T_P$  и  $T_S$  соответственно).

Цель решения состоит в том, чтобы определить  $T_R$  (амплитуда переданной рэлеевской волны в области  $x > L$ ), поскольку затухающий фактор амплитуды  $A(L) = |T_R(L)|$  (при фиксированных параметрах сред и высоты барьера). Рассмотрим контактную грань при  $x=0$  (слева полупространство, справа полупространство с жидкостным резервуаром сверху). Рассмотрим вектор состояния при  $z=0$  (граница раздела полупространства и жидкостного резервуара). Вектор  $\mathbf{e}$  зависит от  $x$  только через модальные амплитуды  $e^{\pm ikx}$ . Каждая собственная мода волны представляет собой вектор состояния  $\mathbf{e}^{(v,\pm)}$ , где  $v$  определяет тип волны, а  $\pm$  определяет распространение вдоль  $x$ .

Использование потенциалов  $\phi$ ,  $\psi$  в грунте дает две эванесцентных моды и классическую рэлеевскую волну в области  $A$ . Введем обозначения:

1. рэлеевская волна ( $R$ ), для которой вектор состояния  $\mathbf{e}^{(R,\pm)}$ ;
2. продольная  $P$ -волна ( $P$ ), для которой вектор состояния  $\mathbf{e}^{(P,+)}$ ;
3. Сдвиговая  $S$ -волна ( $S$ ), для которой вектор состояния  $\mathbf{e}^{(S,+)}$

Амплитуды удобно нормировать на единичную амплитуду волны  $u_x=1$ . Для продольной  $P$ - и сдвиговой  $S$ -волн векторы состояния:

$$\mathbf{e}^{(P,+)} = \begin{bmatrix} ik/\gamma_p \\ 1 \\ 2i\mu k \\ (\lambda + 2\mu)\gamma_p - \lambda ik^2/\gamma_p \end{bmatrix}; \quad \mathbf{e}^{(S,+)} = \begin{bmatrix} ik/\gamma_s \\ 1 \\ 2i\mu k \\ (\lambda + 2\mu)\gamma_s - \lambda ik^2/\gamma_s \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Вектор состояния для рэлеевской волны  $\mathbf{e}_A^{(R,+)}$  – это линейная комбинация потенциалов  $\phi$  и  $\psi$ .

Соберем матрицы амплитуд волн, движущихся влево (-) и вправо (+):

$$\mathbf{E}_A^{(+)} = [\mathbf{e}^{(R,+)}, \mathbf{e}^{(P,+)}, \mathbf{e}^{(S,+)}]; \quad \mathbf{E}_A^{(-)} = [\mathbf{e}^{(R,-)}, \mathbf{e}^{(P,-)}, \mathbf{e}^{(S,-)}]. \quad (28)$$

Для области  $B$  определены три типа волн, для которых горизонтальное волновое число равно падающему  $k$ . Аналогично для области  $A$ , однако в данном случае они модифицируются под влиянием жидкостного потенциала. Для каждой моды волны  $v \in \{1, 2, 3\}$  векторы состояния для падающих (+) и отраженных (-) волн при  $z=0$ :

$$\mathbf{e}^{(v,\pm)} = \begin{bmatrix} u_x^{(v)} \\ u_z^{(v)} \\ \sigma_{zx}^{(v)} \\ \sigma_{zz}^{(v)} \end{bmatrix}_{z=0} e^{\pm ikx}. \quad (29)$$

Соберем матрицы для амплитуд волн, движущихся в разные стороны для области  $B$ :

$$\mathbf{E}_B^{(+)} = [\mathbf{e}^{(1,+)}, \mathbf{e}^{(2,+)}, \mathbf{e}^{(3,+)}]; \quad \mathbf{E}_B^{(-)} = [\mathbf{e}^{(1,-)}, \mathbf{e}^{(2,-)}, \mathbf{e}^{(3,-)}]. \quad (30)$$

Для области  $C$  определим  $\mathbf{E}_C^{(+)} = \mathbf{E}_A^{(+)}$  и  $\mathbf{E}_C^{(-)} = \mathbf{E}_A^{(-)}$ .

Составим контактные интерфейсы в виде векторов состояний. Зададим:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} 1 \\ R_R \\ R_P \\ R_S \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b}^{(+)} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b}^{(-)} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} T_R \\ T_P \\ T_S \end{bmatrix}, \quad (31)$$

где  $F$  и  $B$  – неизвестные для разных типов волн.

Условие непрерывности при  $x=0$  дают следующие соотношения:

$$\mathbf{E}_A^{(+)}\mathbf{a} + \mathbf{E}_A^{(-)} \begin{bmatrix} 0 \\ R_R \\ R_P \\ R_S \end{bmatrix} = \mathbf{E}_B^{(+)}\mathbf{b}^{(+)} + \mathbf{E}_B^{(-)}\mathbf{b}^{(-)}. \quad (32)$$

Поскольку рэлеевская волна направлена только вправо, то первый столбец  $\mathbf{E}_A^{(-)}$  умножается на 0. Разделим соотношение (32) на два четырехкомпонентных вектора:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{E}_A^{(+)} & -\mathbf{E}_B^{(+)} \end{bmatrix}}_{\mathbf{K}_1} \begin{bmatrix} 1 \\ F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} - \underbrace{\mathbf{E}_B^{(-)}\mathbf{b}^{(-)}}_{\mathbf{K}_2} = \mathbf{E}_A^{(-)} \begin{bmatrix} 0 \\ R_R \\ R_P \\ R_S \end{bmatrix}. \quad (33)$$

*Распространение поля по длине  $L$  сейсмического барьера.* В пределах области  $B$  каждая прямая и обратная амплитуда приобретает фазовый сдвиг  $e^{\pm ikL}$ . Обозначим:

$$\mathbf{P}(L) = \text{diag}(e^{ikL}, e^{ikL}, e^{ikL}); \quad \mathbf{P}^{-1}(L) = \text{diag}(e^{-ikL}, e^{-ikL}, e^{-ikL}). \quad (34)$$

При  $x=L$ :

$$\mathbf{E}_B^{(+)}\mathbf{P}(L)\mathbf{b}^{(+)} + \mathbf{E}_B^{(-)}\mathbf{P}^{-1}(L)\mathbf{b}^{(-)} = \mathbf{E}_C^{(+)}\mathbf{c} + \mathbf{E}_C^{(-)} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (35)$$

поскольку в области  $C$  не возникает уходящей влево волны (в обратную сторону).

*Глобальная линейная система.* Объединив (33) и (35), получим глобальную систему:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} -\mathbf{E}_B^{(+)} & -\mathbf{E}_B^{(-)} \\ \mathbf{E}_B^{(+)}\mathbf{P}(L) & \mathbf{E}_B^{(-)}\mathbf{P}^{-1}(L) \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}(L)} \begin{bmatrix} \mathbf{b}^{(+)} \\ \mathbf{b}^{(-)} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\mathbf{E}_A^{(+)}\mathbf{a} \\ \mathbf{E}_C^{(+)}\mathbf{c} \end{bmatrix}}_{\mathbf{d}}, \quad (36)$$

где неизвестный вектор  $\boldsymbol{\beta} = (F_1, F_2, F_3, B_1, B_2, B_3)^T$ . При условии определения  $\det \mathbf{M}(L) \neq 0$  решается система:

$$\boldsymbol{\beta} = \mathbf{M}^{-1}(L)\mathbf{d}. \quad (37)$$

Переданные амплитуды  $\mathbf{c}$  появляются в правой части (36), поэтому необходимо добавление условия согласованности для области  $C$ :

$$\mathbf{E}_C^{(+)}\mathbf{c} = \mathbf{E}_B^{(+)}\mathbf{P}(L)\mathbf{b}^{(+)} + \mathbf{E}_B^{(-)}\mathbf{P}^{-1}(L)\mathbf{b}^{(-)}. \quad (38)$$

Объединив (37) и (38), чтобы исключить  $\boldsymbol{\beta}$ , получим подсистему  $3 \times 3$  для  $\mathbf{c}$ :

$$\mathbf{S}(L)\mathbf{c} = \mathbf{t}(L), \quad (39)$$

где  $\mathbf{S}(L) = \mathbf{E}_C^{(+)} - \begin{bmatrix} \mathbf{E}_B^{(+)} & \mathbf{E}_B^{(-)} \end{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{tot}}(L)\mathbf{M}^{-1}(L) \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 3} \\ \mathbf{E}_C^{(+)} \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{P}_{\text{tot}}(L) = \text{diag}(\mathbf{P}(L), \mathbf{P}^{-1}(L))$ , а

$$\mathbf{t}(L) = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_B^{(+)} & \mathbf{E}_B^{(-)} \end{bmatrix} \mathbf{P}_{\text{tot}}(L) \mathbf{M}^{-1}(L) \begin{bmatrix} \mathbf{E}_A^{(+)} \mathbf{a} \\ \mathbf{0}_{4 \times 1} \end{bmatrix}.$$

Аналитическое упрощение в приближении «длинного резервуара». Для  $kL \gg 1$  внедиагональные блоки  $\mathbf{M}(L)$  быстро осциллируют и усредняются, оставляя распространение только рэлеевских волн. Обращение  $\mathbf{M}(L)$  можно выполнить на основе теории вековых возмущений (secular perturbation theory) [27, 28]. Сохраняя только ведущие диагональные члены, получим:

$$\mathbf{M}(L) \approx \begin{bmatrix} -\mathbf{E}_B^{(+)} & -\mathbf{E}_B^{(-)} \\ \mathbf{E}_B^{(+)} \mathbf{P}(L) & \mathbf{E}_B^{(-)} \mathbf{P}^{-1}(L) \end{bmatrix}. \quad (40)$$

Пусть трехмерные векторы  $\mathbf{x}^{(+)}$  и  $\mathbf{x}^{(-)}$  в – это амплитуды решений на правой границе  $x=L$ . На правой границе нет входящей волны и есть выходящая переданная амплитуда рэлеевской волны  $T_R(L)$ , которая алгебраически записывается как

$$T_R(L) \mathbf{e}_{(R,+)} = \mathbf{E}_B^{(+)} \mathbf{x}^{(+)} + \mathbf{E}_B^{(-)} \mathbf{x}^{(-)}. \quad (41)$$

На левой границе  $x=0$  падающая волна слева. Распространение  $\mathbf{x}^{(\pm)}$  определяется как

$$\mathbf{E}_B^{(+)} \mathbf{P}(L) \mathbf{x}^{(+)} + \mathbf{E}_B^{(-)} \mathbf{P}^{-1}(L) \mathbf{x}^{(-)} = \mathbf{e}_{(R,+)}. \quad (42)$$

Поскольку  $\mathbf{E}_B^{(\pm)}$  – обратимая матрица  $3 \times 3$  (их столбцы – линейно независимые моды), в Maple было вычислено дополнение Шура [29] для блочной матрицы (40):  $\mathbf{S}_D := \mathbf{D} - \mathbf{C} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} = \mathbf{E}_B^{(-)} \mathbf{P}^{-1} - \mathbf{E}_B^{(+)} \mathbf{P} (\mathbf{E}_B^{(+)})^{-1} \mathbf{E}_B^{(-)}$ , чтобы исключить элементы, находящиеся ниже блочной диагонали. На основе преобразований и линейной алгебры в Maple было получено:

$$T_R(L) = \frac{2i \sin(kL)}{e^{ikL} \mathbf{Q}^{(+)} + e^{-ikL} \mathbf{Q}^{(-)}}, \quad (43)$$

где  $\mathbf{Q}^{(\pm)} = \left( \mathbf{e}_{(R,-)} \right)^T \left[ \left( \mathbf{E}_B^{(\pm)} \right)^{-1} \mathbf{e}_{(R,+)} \right]$ .

Выражение (43) показывает, что для рэлеевской энергии полная передача происходит при  $kL = n\pi$  ( $n \in \mathbb{Z}$ ). Между резонансами амплитуда экспоненциально подавляется, как только мнимая часть  $\text{Im} \mathbf{Q}^{(\pm)} \neq 0$ .

Аналитическое решение для коэффициента затухания при  $kH \ll 1$  и  $kL \lesssim 1$ . При малых  $kH \ll 1$  рассматривается только рэлеевская волна, поскольку остальные являются эванесцентными и быстро затухающими. Положим:

$$\mathbf{E}_B^{(+)} \rightarrow \mathbf{e}^{(3,+)}; \quad \mathbf{E}_B^{(-)} \rightarrow \mathbf{e}^{(3,-)}. \quad (44)$$

Тогда выражение (43) упрощается:

$$T_R(L) = \frac{1}{\text{ch}(\alpha_f L) + \frac{i}{2} (\kappa + \kappa^{-1}) \text{sh}(\alpha_f L)}, \quad (45)$$

где  $\alpha_f = \frac{\rho_f H \omega^2}{2\mu_s c_s} \frac{c_s^2 - c_R^2}{c_R c_s}$ , а  $\kappa = \frac{c_s^2 - c_R^2}{c_R^2}$ .

Отсюда коэффициент затухания амплитуд  $A(L) = |T_R(L)|$ :

$$A(L) = \frac{1}{\sqrt{\operatorname{ch}^2(\alpha_f L) + \frac{1}{4}(\kappa + \kappa^{-1})^2 \operatorname{sh}^2(\alpha_f L)}}. \quad (46)$$

Рассмотрим некоторые случаи:

- при  $L \rightarrow 0$  (отсутствует жидкостный резервуар – барьер) получим, что  $\alpha_f L \ll 1$ ,

тогда  $A \approx 1$ ;

- при  $\alpha_f L \gg 1$  получим  $A \sim \frac{2e^{-\alpha_f L}}{|\kappa + \kappa^{-1}|}$  – экспоненциальное затухание, контролируемой

эффективной добавочной массой  $\rho_f H$ ;

- при менее жестком полупространстве (малом  $\mu_s$ ) или более высоком столбе жидкости  $H$ , увеличивается  $\alpha_f$  и усиливаются затухания.

*Решение для волн Лява.* Волны Рэлея сочетают в себе плоские и вертикальные движения и поэтому кинематически взаимодействуют с водным слоем (жидкостным резервуаром) через вертикальные перемещения и нормальные напряжения. Волны Лява, напротив, являются сдвиговыми SH-модами, т.е. единственная компонента перемещений  $u_y(x, z, t)$  перпендикулярна плоскости распространения  $(x, z)$ . Хотя водный слой не обладает жесткостью на сдвиг, его само присутствие изменяет граничное условие по касательным напряжениям, действующее на твердое полупространство. Необходимо выяснить, приводит ли эта модификация к изменению дисперсионного соотношения и любому затуханию, когда барьер имеет конечную длину.

Внутри твердого полупространства  $z < 0$  линейное уравнение теории упругости для SH-волн имеет вид [23, 24]:

$$\rho_s \ddot{u}_y = \mu_s (u_{y,xx} + u_{y,zz}). \quad (47)$$

Обозначим волновой оператор (оператор Д’Аламбера)  $\square \equiv \nabla^2 - \frac{1}{c_s^2} \partial_{tt}$ . Тогда  $\square u_y = 0$ .

Будем искать гармонические решения  $u_y(x, z, t) = \operatorname{Re}\{U(x, z)e^{-i\omega t}\}$  в виде [23]:

$$U(x, z) = e^{ikx} \varphi(z); \quad \varphi''(z) - \left(k^2 - \frac{\omega^2}{c_s^2}\right) \varphi(z) = 0. \quad (48)$$

Затухающим решением при  $z < 0$  является

$$\varphi(z) = B e^{\gamma_s z}, \quad (49)$$

где  $B$  – константа интегрирования, определяющая амплитуду волнового поля.

*Граничное условие при  $z=0$ .* При наличии свободной поверхности сверху касательное напряжение должно обращаться в ноль:

$$\sigma_{zy} = \mu_s \partial_z u_y = 0; \quad \Rightarrow \quad \mu_s \gamma_s B = 0; \quad \Rightarrow \quad B \neq 0 \Rightarrow \gamma_s = 0. \quad (50)$$

Однако  $\gamma_s = 0$  означает, что  $\omega = c_s k$ . Следовательно, классическая волна Лява не существует в упругом полупространстве со свободной поверхностью, что подтверждается классическими результатами [23, 30]. Волны Лява требуют низкоскоростного слоя для удержания энергии SH-волн. Однако реальные среды являются многослойными. При меньшей скорости сдвига  $c_s$  делает возможным распространение волн Лява. Жидкостный резервуар

заменяет данный слой средой с нулевой жесткостью на сдвиг. Для области  $A$  моделируем тонкий слой толщиной  $h_0 \ll \lambda$  и скоростью сдвиговых волн  $c_{s_0} \ll c_s$ . Классическая дисперсия волн Лява для такой структуры задается уравнением [23, 24]:

$$\operatorname{tg}(\gamma_{s_0} h_0) = \frac{\mu_s \gamma_s}{\mu_0 \gamma_{s_0}}, \quad (51)$$

где  $\gamma_{s_0}^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{c_{s_0}^2}$ .

Тонкий слой предлагается присутствующим во всех трех областях. Единственное различие, что слой  $B$  имеет жидкостный слой (резервуар), в то время как области  $A$  и  $C$  – имеют свободную поверхность.

Для области  $B$  (слой, на поверхности которого жидкостный резервуар) располагается слой жидкости высотой  $H$ . Поскольку жидкость (например, вода) не имеет жесткости на сдвиг, то касательные напряжения на границе раздела сред  $z=0$  обращаются в ноль, т.е. выполняется то же условие (50). Следовательно, наличие жидкостного (водного) слоя не меняет локальное вертикальное граничное условие для SH-волн в твердой среде. Отсюда собственные вертикальные функции  $\varphi(z)$  и дисперсионное соотношение (51) остаются неизменными независимо от того, покрыт ли грунт слоем жидкости или нет. Волны Лява содержат только горизонтальный сдвиг. Жидкостный слой, не обладая жесткостью на сдвиг, не создает восстанавливающей силы и не добавляет инерции этому горизонтальному движению.

Поскольку вертикальные перемещения отсутствуют, скачок на границе при  $x=0$  и  $x=L$  (между границами жидкостного слоя) все же может рассеивать энергию через условие непрерывности полного перемещения и напряжений, например, если возникали малые вертикальные движения, взаимодействующие с жидкостными акустическими волнами. Однако деформация вне плоскости гарантирует нулевое вертикальное перемещение повсюду ( $u_x = u_z = 0$ ) и единственное ненулевое напряжение  $\sigma_{zy}$ , которое уже обнуляется при  $z=0$ . Следовательно, нет физической величины, через которую волны Лява могли бы взаимодействовать с жидкостью при  $x=\text{const}$ . Приведем данное доказательство. Пусть падающая волна Лява задается:

$$U_{\text{inc}} = e^{ikx} B e^{\gamma_s z} e^{-i\omega t}, \quad (52)$$

где  $\gamma_s > 0$ .

Предположим, что отражение создает амплитуду  $R_T$  и коэффициент прохождения волны  $T_T$ . Тогда решение в областях  $A$  и  $C$  будет иметь вид:

$$\begin{aligned} U_A &= [e^{ikx} + R_L e^{-ikx}] B e^{\gamma_s z} e^{-i\omega t}, & x < 0; \\ U_C &= T_L e^{ik(x-L)} B e^{\gamma_s z} e^{-i\omega t}, & x > L. \end{aligned} \quad (53)$$

Внутри области  $B$  ( $0 < x < L$ ) необходимо включить прямые и обратные компоненты с одинаковым вертикальным профилем (отсутствие дисперсии):

$$U_B = [F_L e^{ikx} + B_L e^{-ikx}] B e^{\gamma_s z} e^{-i\omega t}. \quad (54)$$

Непрерывность перемещений при  $x=0$  ( $U_A = U_B$ ) дает следующее соотношение:

$$1 + R_L = F_L + B_L. \quad (55)$$

Непрерывность касательного напряжения  $\sigma_{xy} = \mu_s \partial_x U$  при  $x=0$ :

$$\mu_0 ik (1 - R_L) = \mu_0 ik (F_L - B_L) \Rightarrow 1 - R_L = F_L - B_L. \quad (56)$$

Решая уравнения (55) и (56), получим, что  $F_L = 1$ , а  $B_L = R_L = 0$ .

Далее применяем такие же условия непрерывности для границы  $x=L$ :

$$U_B \Big|_{x=L} = \left[ e^{ikL} \right] B e^{\gamma_s z} e^{-i\omega t}, \quad U_C \Big|_{x=L} = T_L B e^{\gamma_s z} e^{-i\omega t}. \quad (57)$$

Условие непрерывности перемещений предполагает, что  $e^{ikL} = T_L$ . Непрерывность касательных напряжений  $ike^{ikL} = ikT_L$  (идентично уже выполненным условиям по перемещениям). Из этого следует, что  $T_L = e^{ikL}$ , тогда как  $R_L = 0$ . Коэффициент прохождения волны имеет модуль, равный единице, отличаясь лишь фазой распространения внутри области  $B$ , в то время как коэффициент отражения равен 0. Таким образом:

$$A_L(L) = |T_L| = 1 \quad (58)$$

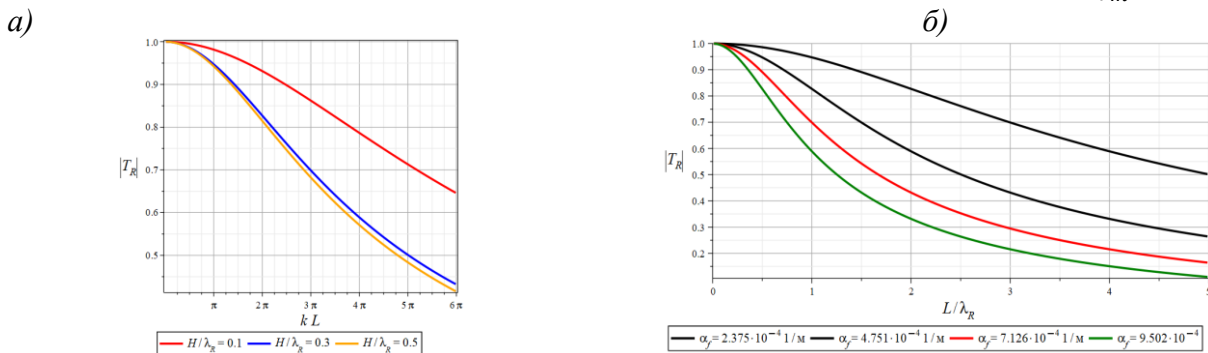
Для любого  $k$ ,  $H$ ,  $L$  и  $\rho_f$ . Для волн Лява невозможно достичь затухания при помощи жидкостного резервуара на свободной поверхности независимо от глубины или ширины.

### 3. Результаты исследования и их анализ

Приведем результаты по исследованию защитных свойств сейсмического барьера в виде жидкостного резервуара по предлагаемой модели в ПК Maple. Результаты приведены для следующих параметров грунтовой среды:  $\rho_s=2000 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_s=300 \text{ м/с}$ ,  $c_p=1500 \text{ м/с}$  и жидкости (рассматривается водная среда):  $\rho_f=1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_f=300 \text{ м/с}$ .

Рисунок 2,а показывает зависимость модуля передаточной функции рэлеевской волны  $T_R(L)$  для разных высот резервуара  $H$ . На графике видно экспоненциальное падение  $|T_R(L)|$  при больших  $L$ . Данный эффект экранирования можно использовать при проектировании жидкостных резервуарных барьеров.

На рисунке 2,б приведены результаты исследования чувствительности передаточной функции к изменению коэффициента  $\alpha_f$ . Каждая кривая отвечает различной «интенсивности» жидкостного взаимодействия. На основе анализа графических результатов видно, что даже умеренное увеличение  $\alpha_f$  (например, из-за большей плотности или глубины жидкости) приводит к значительному снижению проходящей амплитуды. Это иллюстрирует аналитические выводы о влиянии добавочной массы  $\rho_f H$  и влиянии параметра  $\frac{th(\gamma_m H)}{\gamma_m}$ .



**Рисунок 2 – Результаты исследования: а) зависимость модуля передаточной функции рэлеевской волны  $T_R(L)$  для разных высот резервуара  $H$ , б) исследования чувствительности передаточной функции к изменению коэффициента  $\alpha_f$  (для  $\omega=6.28 \text{ рад/с}$ ,  $H/\lambda_R=0.30$ )**

На рисунке 3 представлены изополя модуля передаточной функции  $|T_R|$  для рэлеевской волны при наличии наземного жидкостного резервуара конечной высоты  $H$  и длины  $L$ . Изополя построены в безразмерных координатах  $H/\lambda_R$  и  $L/\lambda_R$ , где  $\lambda_R=2\pi/k$ . Полученные результаты трактуются следующим образом: область у начала координат

( $H/\lambda_R \rightarrow 0; L/\lambda_R \rightarrow 0$ ) соответствуют отсутствию барьера  $|T_R| \approx 1$ . Увеличение любой из координат ведет к росту аргумента  $\alpha_f L$  и уменьшению  $|T_R| \approx 1$  (экспоненциальная форма). При малых глубинах ( $H/\lambda_R \lesssim 0.05H$ ) влияние барьера невелико,  $|T_R|$  остается близким к единице даже при заметной длине  $L$ . Это согласуется с линейным по  $H$  характером ведущей поправки в дисперсии при  $kH \ll 1$ . Начиная с умеренных высот ( $H/\lambda_R \sim 0.1-0.2$ ) возникает набор кривых, поскольку дальнейшее возрастание длины  $L/\lambda_R$  быстро снижает  $|T_R|$  и формируется зона эффективного экранирования от поверхностных волн. При больших длинах ( $L/\lambda_R \gtrsim 2-3$ ) и достаточной высоте  $H/\lambda_R$  передаточная функция  $|T_R|$  приближается к устойчиво малым значениям ( $\alpha_f L \gg 1$ ), что соответствует экспоненциальному затуханию.

В размерных величинах это означает, что масштаб барьера определяется прежде всего длиной рэлеевской волны в рассматриваемом частотном диапазоне. Для скоростей  $c_R \approx 250 - 350$  м/с и диапазона частот  $f = 2 - 10$  Гц получаем  $\lambda_R \approx 25 - 175$  м, что соответствует, ориентировочно,  $H \approx (0.1 - 0.2)\lambda_R \approx 2.5 - 35$  м и  $L \approx (2-3)\lambda_R \approx 50 - 525$  м. Для подавления высокочастотных колебаний (например, техногенные источники с частотой воздействия 8 - 20 Гц) требуемые габариты уменьшаются пропорционально  $\lambda_R$ . При назначении длины  $L$  важно учитывать существование резонансов при  $kL = n\pi$ , поэтому следует избегать значения  $L \approx n\lambda_R/2$  в рассматриваемом диапазоне частот.

Данные результаты позволяют проводить предварительное проектирование сейсмобарьера в виде жидкостного резервуара по требуемому уровню ослабления. В отдельности отметим, что нормировка на  $\lambda_R$  делает результаты слабо зависящей от частоты при практически неизменной  $c_R$ . Для детального учета частотных эффектов можно отказаться от нормировки по одной из осей либо использовать частотно-зависимое  $c_R$  из полной дисперсии.

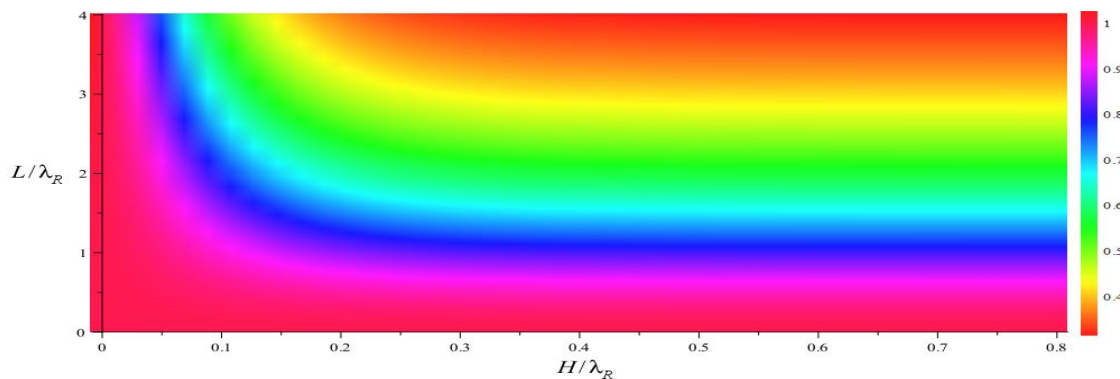


Рисунок 3 – Изополя эффективности жидкостного барьера для защиты от рэлеевских волн

### Инженерные требования к конструкции резервуара и ограничения разрабатываемой модели

В предложенной идеализированной модели ключевой физической механизм заключен в инерционном нагружении поверхности за счет добавочной массы жидкости  $\rho_f H$  и связанных с этим изменения условий на границе раздела сред «грунт – жидкость». Поэтому для практической реализации конструкций рассматриваемого жидкостного резервуара принципиальные следующие моменты:

1. Днище (основание) резервуара должно следовать вертикальным перемещениям поверхности (без локального отрыва и значительных проскальзываний), иначе эффективность

снижается из-за нарушения предпосылок контактных условий. На практике это требует контроля несущей способности основания, осадок и предельных деформаций, а также исключения «скользящих» прослоек (например, чрезмерно податливых или гидроизоляционных решений с низким трением) в зоне контакта.

2. Помимо гидростатического давления, при сейсмическом воздействии возникают динамические нагрузки и колебания свободной поверхности. Конструкция должна обеспечивать прочность и устойчивость (включая сдвиг или опрокидывание, локальную потерю устойчивости стенок), а также иметь достаточный запас по свободной высоте борта для предотвращения перелива при расчетных воздействиях.

3. Рассмотренная постановка является двумерной, что соответствует длинному барьеру с протяженностью в поперечном направлении, существенно превышающей  $\lambda_R$ . В трехмерной среде возможен обход волны вокруг концов барьера и дифракционные эффекты, поэтому для территориальной защиты целесообразно либо обеспечивать достаточную ширину барьера и перекрытие защищаемой зоны по фронту, либо использовать замкнутые или кольцевые конфигурации, либо каскад/сетку резервуаров.

4. Эффективность барьера сильно зависит от высоты жидкости  $H$  (через  $\rho_f H$ ), поэтому уровень заполнения должен поддерживаться в заданных пределах.

Полученное аналитическое решение имеет ряд ограничений, связанных с вопросами идеализации. Среди основных факторов, которые могут повлиять на передаточную функцию для рэлеевской волны можно выделить:

1. В модели вязкость жидкости не учитывается. В реальности вязкость, турбулентные потери при колебаниях на свободной поверхности и внутреннее затухание грунта обычно приводят к дополнительному рассеянию энергии и могут частично сглаживать резонансы при  $kL = n\pi$ .

2. При сильных воздействиях (значительных амплитуд воздействий) возможны случаи, выходящие за рамки линейной постановки (волнообразование, удар о стенки, перелив), что требует отдельного расчета (например, сопряженного численного моделирования задачи гидродинамики и динамики основания) при обосновании механической безопасности [31].

3. Скорости  $c_R$  и дисперсия зависят от реального профиля грунта. Следовательно, для проектирования необходимо использовать данные инженерно-геофизических изысканий и при необходимости применять частотно-зависимое  $c_R(\omega)$ .

4. Жесткость и собственные колебания оболочки резервуара, а также податливость основания и сцепление с грунтом могут вводить дополнительные частотные эффекты (формы колебаний самой конструкции), изменяя эффективную добавочную массу и граничные условия по сравнению с идеализированной схемой.

В целом, приведенные инженерные соображения не меняют выявленного в работе механизма подавления рэлеевских волн за счет инерционного слоя, но задают границы применимости результатов и перечень факторов, которые должны быть учтены на этапе перехода от предварительного подбора геометрических параметров  $H$  и  $L$  к проектированию конструкции. Также следует учитывать, что показанная неэффективность жидкостного барьера для SH-волн Лява означает целесообразность комбинирования рассматриваемого решения с альтернативными средствами, воздействующими на сдвиговые моды, при необходимости комплексной территориальной защиты.

#### 4. Заключение

В работе была предложена и обоснована концепция защиты зданий и сооружений от поверхностных волн на основе сейсмического барьера в виде наземного жидкостного резервуара. На основе проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Построена математическая модель взаимодействия поверхностных волн с сейсмическим барьером в виде наземного резервуара с учетом слабой сжимаемости жидкости, находящимся на упругом полупространстве. Взаимодействие построено на граничных условиях контакта системы «упругое полупространство – жидкость» на уровне свободной поверхности. Получено дисперсионное соотношение для рэлеевских волн при конечной высоте жидкостного слоя (формула (22)) и показано, что оно корректно переходит к классическим предельным случаям отсутствия жидкости, бесконечной глубины и несжимаемой жидкости (формулы (23)-(26)), что служит внутренней верификацией модели.

2. Для сейсмического барьера выведена передаточная формула, описывающая амплитуду прошедшей рэлеевской волны  $T_R$ , из которой следуют две значимые особенности:

а. наличие резонансов (отсутствие подавления колебаний) при  $kL=n\pi$ ;

б. экспоненциальное подавление между резонансами, контролируемое параметром  $\alpha_f$ , пропорциональным добавочной массе  $\rho_f H$  и  $\omega^2/\mu_s$  с поправкой на отношение скоростей  $c_R/c_s$  (формулы (43), (45) и (46)).

Данные зависимости определяют параметры настройки сейсмического барьера в виде наземного жидкостного резервуара – плотность жидкости, высоту и длину барьера, а также частотный диапазон.

3. Показано, что для SH-волн Лява жидкостный надземный резервуар не создает сдвиговую жесткость и не добавляет инерции для горизонтального сдвига, вследствие чего сейсмический барьер не ослабляет волны Лява, что требует иных средств территориальной сейсмической защиты.

4. Практическая реализуемость жидкостного барьера определяется масштабом  $\lambda_R$  в рассматриваемом диапазоне частот, поскольку эффективное экранирование достигается при  $H/\lambda_R \sim 0.1-0.2$  и  $L/\lambda_R \gtrsim 2-3$ , при этом следует избегать длин порядка  $L \sim n\lambda_R/2$  из-за наличия резонанса.

При проектировании резервуара требуется обеспечить надежный контакт «грунт – резервуар», чтобы исключить отрыв и проскальзывание на границе сред. Необходимо проводить расчеты на прочность и устойчивость стенок и днища с учетом гидростатических и динамических нагрузок, а также учитывать влияние неидеальностей предлагаемой модели (диссипацию вследствие турбулентности, нелинейные колебания свободной поверхности при сильных воздействиях, слоистость грунта, трехмерность и собственные частоты и формы колебаний конструкции резервуара), которые могут изменять количественную оценку модуля передаточной функции.

## 5. Благодарности

Работа выполнена за счет гранта РФФИ № 24-49-02002.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 169 с.
2. Tarasenko A., Čtvrtlík R., Kudělka R. Theoretical and experimental revision of surface acoustic waves on the (100) plane of silicon //Scientific Reports. 2021. Vol. 11. No. 1. P. 2845. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82211-6>
3. Jauhari N., Hegde A., Chakraborty P. Full scale field studies for assessing the vibration isolation performance of single and dual trenches //Transportation Geotechnics. 2023. Vol. 39. P. 100932. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100932>
4. Повколас К. Э., Шавловская О. А. Оценка эффективности конструкции вертикального барьера в виде открытой траншеи с креплением стенок для снижения вибраций, распространяющихся в грунтовой среде //Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. 2024. №. 4. С. 33-39. doi:10.52928/2070-1683-2024-39-4-33-39
5. Исраилов М. Ш. Дифракция и гашение колебаний барьерами в упругих средах //Вестник Московского университета. Серия I. Математика. Механика. 2021. №. 1. С. 35-39.

6. Камчыбекова А. Т. Моделирование эффективности грунтовых и грунтосиликатных свайных барьеров для снижения сейсмических воздействий на здания // Вестник науки. 2025. Т. 2. №. 4 (85). С. 850-854.
7. Митрошин В. А. Сейсмическая защита зданий и сооружений с применением метаматериалов: текущее состояние и перспективы развития // Архитектура, строительство, транспорт. 2024. №. 2. С. 67-83. doi: 10.31660/2782-232X-2024-2-67-83
8. Brûlé S., Javelaud E. H., Enoch S., Guenneau S. Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves // Physical review letters. 2014. Vol. 112. No. 13. P. 133901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.133901>
9. Colombi A., Roux P., Guenneau S., Gueguen P., Craster R. V. Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances // Scientific reports. 2016. Vol. 6. No. 1. P. 19238. <https://doi.org/10.1038/srep19238>
10. Кузнецов С. В., Саиян С. Г. Нелинейные акустические волны в гиперупругих стержнях // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2025. № 2. С. 210-225. – DOI 10.31857/S1026351925020129
11. Гринченко В.Т., Комиссарова Г.Л. Поверхностные волны в системе упругий слой на жидком полупространстве // Акустический вестник. 2005. Т. 8. № 4. С. 38-45.
12. Ковтун А. А. Поверхностные волны на границе упруго-пористой среды и жидкости // Вопросы геофизики. 2013. №. 46. С. 14-25.
13. Pradhan N., Samal S. K. Surface waves propagation in a homogeneous liquid layer overlying a monoclinic half-space // Applied Mathematics and Computation. 2022. Vol. 414. P. 126655. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126655>
14. Bagheri A., Greenhalgh S., Khojasteh A., Rahimian M. Dispersion of Rayleigh, Scholte, Stoneley and Love waves in a model consisting of a liquid layer overlying a two-layer transversely isotropic solid medium // Geophysical Journal International. 2015. Vol. 203. No. 1. Pp. 195-212. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv278>
15. Kumari M., Kaswan P., Kumar M., Lewis R. W., Oztop H. F., Singh N., Obalalu A. M., Pushkarna M., Berhanu M. Seismic wave reflection characteristics and wave-induced fluid flow in unsaturated porous solid // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. No. 1. P. 18840. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97275-x>
16. Russillo A. F., Failla G. Seismic metamaterials for Rayleigh wave attenuation: A novel concept of soil-embedded water-tank metabarrier // International Journal of Solids and Structures. 2025. P. 113656. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2025.113656>
17. Li L., Fang Y., Aziz M. M., Shi Y., Zhang L., Dong X., Li L. Adjustable embedded seismic metamaterial based on fluid-solid coupling mechanism // Structures. Elsevier. 2025. Vol. 81. P. 110429. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110429>
18. Беседина А.Н., Тубанов Ц.А., Предеин П.А., Санжиева Д.П., Иванченко Г.Н. Особенности микросейсм озера Байкал по данным сети сейсмических станций // Физика земли. 2024. №3. С. 30-50. doi: 10.31857/S0002333724030041
19. Туманов В. В., Новгородцева Л. А., Бородин Д. С., Грицаенко А. Ю., Ялпуга Е. А. Сравнение характеристик амплитудно-частотных спектров сложного сигнала, полученных по данным сейсмического мониторинга на шахтном поле // Труды РАНМИ. 2024. №. 3 (41)-2. С. 202-213. doi: 10.24412/2519-2418-2024-341-202-213
20. Tanimoto T., Anderson A. Seismic noise between 0.003 Hz and 1.0 Hz and its classification // Progress in Earth and Planetary Science. 2023. Vol. 10. No. 1. P. 56.
21. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.
22. Григорьев Ю. М., Гаврильева А. А. Задача распространения поверхностной волны Релея в полупространстве среды Коссера в случае однородных и упруго-стесненных граничных условий // Математические заметки СВФУ. 2023. Т. 30. №. 4. С. 81-104. doi:10.25587/2411-9326-2023-4-81-104
23. Ewing M., Jardetzky W. Press F. Elastic Waves in Layered Media. McGraw-Hill, New York. 1957. 405 p.
24. Brekhovskikh L. M. Waves in Layered Media. New York: Academic Press. 1980. 503 p.
25. Sidorovskaia N. A. Systematic studies of pulse propagation in ducted oceanic waveguides in normal mode representation // The European Physical Journal-Applied Physics. 2004. Vol. 25. No. 2. Pp. 113-131. doi:10.1051/epjap:2003089
26. Labarbe J., Kirillov O. N. Membrane flutter induced by radiation of surface gravity waves on a uniform flow // Journal of Fluid Mechanics. 2020. Vol. 901. P. A4. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.533>
27. Perturbation theory // Encyclopedia of Mathematics / European Mathematical Society (EMS). URL: [https://encyclopediaofmath.org/wiki/Perturbation\\_theory](https://encyclopediaofmath.org/wiki/Perturbation_theory) (дата обращения: 30.07.2025)
28. Джакаля Г. Е. О. Методы теории возмущений для нелинейных систем. М.: Наука. 1979. 320 с.
29. Watt S. M., Jeffrey D. J. An Abstraction-Preserving Block Matrix Implementation in Maple // 2024 26th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC). IEEE, 2024. Pp. 49-52. DOI: 10.1109/SYNASC65383.2024.00021
30. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука. 1981. 288 с.
31. Саиян С. Г., Васильев А. В. Численное моделирование динамического отклика башни «Эволюция» при ветровом воздействии с учетом застройки и разрешением турбулентности // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 2. С. 246-279. DOI 10.22227/1997-0935.2025.2.246-279.

REFERENCES

1. Viktorov I.A. Fizicheskiye osnovy primeneniya ul'trazvukovykh voln Releya i Lemba v tekhnike [Physical fundamentals of the application of Rayleigh and Lamb ultrasonic waves in engineering]. Moscow: Nauka, 1966. 169 p. (rus)
2. Tarasenko A., Čtvrtlík R., Kudělka R. Theoretical and experimental revision of surface acoustic waves on the (100) plane of silicon. *Scientific Reports*. 2021;11(1):2845. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82211-6>
3. Jauhari N., Hegde A., Chakraborty P. Full scale field studies for assessing the vibration isolation performance of single and dual trenches. *Transportation Geotechnics*. 2023;39:100932. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100932>
4. Povkolas K.E., Shaulouskaya O.A. Otsenka effektivnosti konstruktсии vertikal'nogo bar'yera v vide otkrytoy transhei s krepleniem stenok dlya snizheniya vibratsiy, rasprostranyayushchikhsya v gruntovoy srede [Assessment of the efficiency of the vertical barrier design in the form of an open trench with fastening of walls to reduce vibrations propagation in the ground environment]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. 2024;(4):33–39. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-39-4-33-39. (rus)
5. Israilov M.S. Diffraction and Vibration Attenuation by Obstacles in Elastic Media. *Moscow Univ. Mech. Bull.* 2021;76:1–6. <https://doi.org/10.3103/S0027133021010039>
6. Kamchybekova A.T. Modelirovaniye effektivnosti gruntovykh i gruntosilikatnykh svaynykh bar'yerov dlya snizheniya seysmicheskikh vozdeystviy na zdaniya [Modeling the effectiveness of groundwater and grout silicate pile barriers for reducing seismic impacts on buildings]. *Vestnik nauki [Science Bulletin]*. 2025;2(85):850–854. (rus)
7. Mitroshin V.A. Seismic protection of buildings and structures using metamaterials: current status and development prospects. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(2):67-83. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-2-67-83>
8. Brûlé S., Javelaud E.H., Enoch S., Guenneau S. Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves. *Physical Review Letters*. 2014;112(13):133901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.112.133901>
9. Colombi A., Roux P., Guenneau S., Gueguen P., Craster R.V. Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. *Scientific Reports*. 2016;6(1):19238. <https://doi.org/10.1038/srep19238>
10. Kuznetsov S.V., Saiyan S.G. Nonlinear acoustic waves in hyperelastic rods. *Mechanics of Solids*. 2025;60(2):923-931. DOI: 10.31857/S1026351925020129. (rus)
11. Grinchenko V.T., Komissarova G.L. Poverkhnostnye volny v sisteme uprugiy sloy na zhidkom poluprostranstve [Surface waves in the system elastic layer on liquid half-space]. *Akusticheskii vestnik [Acoustic Bulletin]*. 2005;8(4):38–45. (rus)
12. Kovtun A.I.A. Poverkhnostnye volny na granitse uprugo-poristoy srede i zhidkosti [The surface waves at the interface of poroelastic medium and liquid]. *Voprosy geofiziki [Problems of Geophysics]*. 2013;(46):14–25. (rus)
13. Pradhan N., Samal S.K. Surface waves propagation in a homogeneous liquid layer overlying a monoclinic half-space. *Applied Mathematics and Computation*. 2022;414:126655. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2021.126655>
14. Bagheri A., Greenhalgh S., Khojasteh A., Rahimian M. Dispersion of Rayleigh, Scholte, Stoneley and Love waves in a model consisting of a liquid layer overlying a two-layer transversely isotropic solid medium. *Geophysical Journal International*. 2015;203(1):195–212. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv278>
15. Kumari M., Kaswan P., Kumar M., Lewis R.W., Oztop H.F., Singh N., Obalalu A.M., Pushkarna M., Berhanu M. Seismic wave reflection characteristics and wave-induced fluid flow in unsaturated porous solid. *Scientific Reports*. 2025;15(1):18840. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97275-x>
16. Russillo A.F., Failla G. Seismic metamaterials for Rayleigh wave attenuation: a novel concept of soil-embedded water-tank metabarrier. *International Journal of Solids and Structures*. 2025;113656. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2025.113656>
17. Li L., Fang Y., Aziz M.M., Shi Y., Zhang L., Dong X., Li L. Adjustable embedded seismic metamaterial based on fluid-solid coupling mechanism. *Structures*. 2025;81:110429. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110429>
18. Besedina A.N., Tubanov Ts.A., Predein P.A., Sanzhieva D.P.-D., Ivanchenko G.N. Osobennosti mikroseyms ozera Baykal po dannym seti seysmicheskikh stantsiy [Lake Baikal Microseisms Based on Regional Seismic Network Data]. *Fizika Zemli [Physics of the Solid Earth]*. 2024;(3):30–50. DOI: 10.31857/S0002333724030041. (rus)
19. Tumanov V.V., Novgorodtseva L.A., Borodin D.S., Griptaenko A.Y., Yalputa E.A. Sravneniye kharakteristik amplitudno-chastotnykh spektrov slozhnogo signala, poluchennykh po dannym seysmicheskogo monitoringa na shakhtnom pole [Comparison of characteristics of the amplitude-frequency spectra of a complex signal received from seismic monitoring data in a mine field]. *Trudy RANIMI [Proceedings of the Russian Academy of Sciences]*. 2024;(3(41)-2):202–213. DOI: 10.24412/2519-2418-2024-341-202-213. (rus)
20. Tanimoto T., Anderson A. Seismic noise between 0.003 Hz and 1.0 Hz and its classification. *Progress in Earth and Planetary Science*. 2023;10(1):56. <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00603-8>
21. Landau L.D., Lifshitz E.M. Teoriya uprugosti [Theory of Elasticity]. Moscow: Nauka, 1987. 246 p. (rus)
22. Grigor'yev Yu.M., Gavrilieva A.A. Zadacha rasprostraneniya poverkhnostnoy volny Releya v poluprostranstve srede Kossera v sluchaye odnorodnykh i uprugo-stesnennykh granichnykh usloviy [Propagation problem of a Rayleigh surface wave in the half-space of a Cosserat medium in the case of homogeneous and elastically

- constrained boundary condition]. *Matematicheskiye zametki SVFU [Mathematical Notes of NEFU]*. 2023;30(4):81–104. DOI: 10.25587/2411-9326-2023-4-81-104. (rus)
23. Ewing M., Jardetzky W., Press F. *Elastic Waves in Layered Media*. New York: McGraw-Hill, 1957. 405 p.
24. Brekhovskikh L.M. *Waves in Layered Media*. New York: Academic Press, 1980. 503 p.
25. Sidorovskaia N.A. Systematic studies of pulse propagation in ducted oceanic waveguides in normal mode representation. *The European Physical Journal – Applied Physics*. 2004;25(2):113–131. DOI: 10.1051/epjap:2003089
26. Labarbe J., Kirillov O.N. Membrane flutter induced by radiation of surface gravity waves on a uniform flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2020;901:A4. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.533>
27. Perturbation theory. In: *Encyclopedia of Mathematics*. European Mathematical Society (EMS). [Online]. URL: [https://encyclopediaofmath.org/wiki/Perturbation\\_theory](https://encyclopediaofmath.org/wiki/Perturbation_theory) (accessed 30 July 2025).
28. Dzhakal'ya G.E.O. *Metody teorii vozmushcheniy dlya nelineynykh sistem [Methods of perturbation theory for nonlinear systems]*. Moscow: Nauka, 1979. 320 p. (rus)
29. Watt S.M., Jeffrey D.J. An abstraction-preserving block matrix implementation in Maple. *26th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC)*. IEEE, 2024. Pp. 49–52. DOI: 10.1109/SYNASC65383.2024.00021
30. Viktorov I.A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdykh telakh [Acoustic surface waves in solids]*. Moscow: Nauka, 1981. 288 p. (rus)
31. Saiyan S.G., Vasiliev A.V. Numerical Simulation of the Dynamic Response of the “Evolution” Tower under Wind Action Considering Surrounding Buildings and Turbulence Resolution. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2025;20(2):246–279. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.2.246-279 (rus.)

#### Информация об авторах

##### Саян Сергей Гургенович

научный сотрудник Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова (НОЦ КМ им. А.Б. Золотова), старший преподаватель кафедры строительной и теоретической механики, преподаватель кафедры информатики и прикладной математики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

Младший научный сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

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

##### Васильев Артемий Викторович

студент 2-го курса магистратуры РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина; Ленинский пр-т., дом 65, Москва, 119991;

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

#### Information about authors

##### Saiyan Sergey G.

Researcher, A. B. Zolotov Research and Education Center for Computer Modeling of Unique Buildings, Structures and Complexes; Senior Lecturer, Department of Structural and Theoretical Mechanics; Lecturer, Department of Computer Science and Applied Mathematics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University, NRU MGSU); 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337.

Junior Research Fellow, A. Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences; 101 Vernadsky Avenue, Bldg. 1, Moscow, 119526

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

##### Vasilev Artemiy V.

Second-year Master's student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University); 65 Leninsky Prospekt, Moscow, 119991

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

Статья поступила в редакцию 09.11.2025  
Одобрена после рецензирования 09.02.2026  
Принята к публикации 13.02.2026

The article was submitted 09.11.2025  
Approved after reviewing 09.02.2026  
Accepted for publication 13.02.2026

В.А. СМИРНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ С УЧЕТОМ ЗАДАННОГО ВРЕМЕНИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПЕРИОДА ОБЪЕКТА

**Аннотация.** В действующем нормативном поле РФ (ГОСТ 27751–2014, СП 20.13330 и др.) полувероятностный метод расчёта по предельным состояниям опирается на фиксированные коэффициенты надёжности, которые назначены для определённого срока эксплуатации (как правило, 50 – 75 лет в зависимости от класса ответственности) и типовый набор неопределённостей. При этом в практике строительства возрастает доля временных, модульных и реконструируемых сооружений, а также задач продления ресурса, для которых требуется согласованная корректировка целевых показателей надёжности и локальных коэффициентов безопасности с учетом заданного срока службы. В статье представлен обзор современных вероятностных подходов к обеспечению надёжности сооружений (на примере Eurocode, JCSS, ISO 2394), применяемых при калибровке норм и оценке существующих конструкций. На основе результатов НИР, выполненной в НИУ МГСУ, предлагается инженерная методика перехода от референсного уровня надёжности к заданному сроку эксплуатации  $T$  за счет пересчёта целевого годового индекса надёжности и последующей корректировки локальных коэффициентов  $\gamma_f$  и  $\gamma_m$  по чувствительности (FORM) при логнормальном описании случайных величин. Показано, что для климатических нагрузок (снег, ветер) при  $T \approx 10$ –15 лет расчетные  $\gamma_f$  могут быть снижены примерно на 10–20% при сохранении суммарно допустимого риска за весь срок эксплуатации; для постоянных нагрузок и коэффициентов по материалам корректировки, как правило, малы. Приведены вычислительный алгоритм и иллюстративный расчет для переменной климатической нагрузки.

**Ключевые слова:** надёжность; индекс надёжности  $\beta$ ; проектный срок службы; вероятность отказа; FORM; частные коэффициенты; Eurocode; JCSS; ГОСТ 27751; СП 20.13330.

V.A. SMIRNOV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

## IMPROVING STRENGTH AND RELIABILITY ASSESSMENT METHODS CONSIDERING A SPECIFIED SERVICE LIFE

**Abstract.** In the current Russian framework for limit state design, partial safety factors are commonly calibrated for a reference service life (typically 50 years) and a conventional set of uncertainties. Modern practice increasingly involves temporary, modular and transformable facilities, as well as service-life extension of existing structures, where a consistent adjustment of target reliability and local safety factors to a specified service life is required. This paper reviews contemporary probabilistic concepts used in structural reliability and code calibration (Eurocodes, JCSS, ISO 2394 and service-life design). Based on R&D results obtained at NRU MGSU, an engineering procedure is proposed to map a reference reliability level to a target service life  $T$  by (i) converting the accepted total failure risk over the reference period into an equivalent annual target reliability index and (ii) adjusting local partial factors for actions and resistances using sensitivity factors from FORM under a lognormal representation of basic variables. The approach indicates that for variable climatic actions (snow, wind) the design partial factor  $\gamma_f$  may be reduced by approximately 10–20% for  $T \approx 10$ –15 years while keeping the accepted total risk over the service life constant; for permanent actions and resistance factors  $\gamma_m$ , the correction is usually minor. A step-by-step algorithm and an illustrative calculation example are provided.

**Keywords:** structural reliability; reliability index; service life; failure probability; FORM; partial safety factors; Eurocode; JCSS; GOST 27751, SP 20.13330.

## 1. Введение

Методы обеспечения надежности строительных конструкций развиваются в двух взаимосвязанных парадигмах: (i) нормативный расчет по предельным состояниям с использованием частных коэффициентов безопасности и (ii) вероятностный анализ (структурная надежность), позволяющий количественно оценивать риск отказа и калибровать нормативные требования. В отечественной практике расчёт по предельным состояниям закреплён в ГОСТ 27751–2014 и системе сводов правил, включая СП 20.13330 «Нагрузки и воздействия». Система частных коэффициентов ( $\gamma_f$ ,  $\gamma_m$ ,  $\gamma_n$ ,  $\gamma_c$ , коэффициенты сочетаний  $\psi$  и др.) обеспечивает заданный средний уровень безопасности для типового проектного срока эксплуатации сооружения (как правило, 50 лет). Однако рост доли временных сооружений, реконструкций, а также задач продления ресурса формирует запрос на методику согласования срока службы, целевого индекса надежности и параметров полувероятностного расчета [1, 2, 7, 25, 26]. Современные нормативные документы, включая ГОСТ 27751–2014 «Надёжность строительных конструкций. Основные положения», устанавливают полувероятностный метод расчёта, основанный на использовании частных коэффициентов надёжности по нагрузке, материалу, условиям работы и ответственности [4 – 6]. Однако в действующей редакции нормативной базы Российской Федерации отсутствует чёткая методология корректировки этих коэффициентов в зависимости от проектного (назначенного) срока службы сооружения, что приводит к избыточному запасу прочности при проектировании временных или краткосрочных сооружений и, как следствие, к необоснованным экономическим затратам.

Между тем международные стандарты — в частности, ISO 2394:2015, EN 1990:2002 (Еврокод 0) и рекомендации Совместного комитета по структурной безопасности (JCSS) — предусматривают возможность дифференциации требований к надёжности в зависимости от расчётного периода эксплуатации. Эти подходы основаны на вероятностной интерпретации надёжности, выражаемой через целевой индекс надёжности  $\beta$ , который напрямую связан с допустимой вероятностью отказа за заданный временной интервал. При этом сокращение срока службы объективно снижает вероятность реализации экстремальных нагрузок, что позволяет обоснованно уменьшать коэффициенты запаса без ущерба для общей безопасности объекта [14 – 20].

Фундаментальные исследования отечественных учёных — В.В. Болотина, А.Р. Ржаницына, В.Д. Райзера, О.В. Мкртычева, А.В. Перельмутера, О.В. Кабанцева и др. — заложили теоретические основы вероятностного подхода к оценке надёжности строительных конструкций, включая учёт деградации материалов, статистической изменчивости нагрузок и влияния срока эксплуатации на уровень риска [4 – 6]. Тем не менее, практическая реализация этих положений в нормативных документах РФ остаётся фрагментарной и требует системного обобщения, формализации и адаптации к современным условиям проектирования [21, 22, 28, 29].

В международной практике: ISO 2394, Eurocode (EN 1990) и Probabilistic Model Code JCSS оперируют едиными понятиями надёжности: вероятность отказа  $P_f$ , индекс надёжности  $\beta$ , случайные модели нагрузок и сопротивлений и инструменты оценки (FORM/SORM, Монте-Карло, байесовское обновление) [7 – 9]. В Eurocode целевые значения  $\beta$  задают по классам надёжности и референсным периодам (например, 1 год и 50 лет), что обеспечивает согласованную калибровку частных коэффициентов. JCSS ориентирован на унификацию вероятностных моделей и практику калибровки норм, включая учёт неопределённостей моделей, геометрии, эксплуатационных воздействий и деградации [9, 12, 18]. В инженерной практике вероятностные методы применяются в области ответственных инфраструктурных объектов, при оценке существующих конструкций (ISO 13822), а также в задачах жизненного цикла (life-cycle performance) и сервис-лайф дизайна (ISO 15686, ISO 16204, fib Model Code 2010) [10 – 13, 24 – 26, 33, 35].

В рамках второго поколения Еврокодов уточняют положения EN 1990 по требованиям надёжности и калибровке частных коэффициентов, включая развитие приложений по надёжности (Annex C) [25–27]. Публикации последних лет рассматривают согласование целевых индексов надёжности для проектирования и оценки существующих сооружений, а также корректировку частных коэффициентов с учетом риска и контекста применения [30–

32]. В отечественной научной школе развиваются подходы регулируемых коэффициентов надежности и вероятностного проектирования элементов на заданный уровень надежности и долговечности [28, 29]. Для оценок существующих объектов и жизненного цикла все шире используются процедуры обновления надежности по данным обследований и мониторинга (Bayesian updating, SHM) [33].

## 2. Модели и методы

Учёт заданного срока эксплуатации может быть осуществлен в терминах вероятности отказа за период  $T$  или через эквивалентный годовой уровень риска. В простой модели независимых годовых максимумов переменных нагрузок вероятность безотказной работы за  $T$  лет выражается как:

$$P_{no-fail,T} = P_{no-fail,1}^T, \quad (1)$$

а вероятность отказа как:

$$P_f(T) = 1 - (1 - P_{f,1})^T. \quad (2)$$

Индекс надежности для одного события связывается с  $P_f$  по формуле [31, 32]:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f), \quad (3)$$

где  $\Phi$  — функция стандартного нормального распределения.

Рациональная для оптимизационных постановок идея, заключается в сохранении одинаковой суммарно допустимой вероятности отказа за весь срок эксплуатации при переходе от референсного срока  $T_{ref}$  к новому сроку  $T$ . Тогда допустимая годовая вероятность отказа растет при меньших  $T$ , а эквивалентный годовой индекс надежности  $\beta_{eq}(T)$  уменьшается. С целью уточнения данного подхода (особенно применительно к реконструируемым или восстанавливаемым сооружениям) можно также учитывать зависимость максимумов, деградацию расчётного сопротивления и обновлять информацию по данным обследований/мониторинга сооружения, что приводит к задачам нестационарной надёжности и байесовского обновления [33, 35].

Предлагаемая методика предназначена для инженерного применения в рамках расчета по предельным состояниям без перехода к полноценному вероятностному расчету всей системы. Частные коэффициенты  $\gamma_f$  и  $\gamma_m$  трактуют как параметры калибровки, обеспечивающие заданный целевой индекс надёжности для доминирующего механизма отказа. В предположении логнормальности базовых переменных (нагрузочный эффект  $S$  и сопротивление  $R$ ) и при использовании FORM изменение расчетных значений связывают с изменением  $\beta$  через коэффициенты чувствительности  $\alpha_S$  и  $\alpha_R$  и логнормальные стандартные отклонения  $\sigma_{lnS}$  и  $\sigma_{lnR}$ :

$$\sigma_{lnX} = \sqrt{\ln(1 + \nu_X^2)}, \quad (4)$$

где  $\nu_X$  — коэффициент вариации.

В результате получают экспоненциальные формулы пересчета локальных коэффициентов надёжности:

$$\gamma_f(T) = \gamma_f(T_{ref}) \exp[\alpha_S (\beta_T - \beta_{ref}) \sigma_{lnS}], \quad (5)$$

$$\gamma_m(T) = \gamma_m(T_{ref}) \exp[-\alpha_R (\beta_T - \beta_{ref}) \sigma_{lnR}], \quad (6)$$

где  $\beta_{ref}$  — целевой индекс надёжности для стандартного срока  $T_{ref}$ ;  $\beta_T$  — целевой индекс на срок  $T$ ;  $\alpha_S > 0$ ,  $\alpha_R < 0$  — коэффициенты чувствительности метода;  $\sigma_{lnS} \approx \nu_S$ ,  $\sigma_{lnR} \approx \nu_R$  при малых коэффициентах вариации  $\nu = CoV$  или по формуле (4).

Ключевыми практическими вопросами являются выбор статистических параметров нагрузок/материалов и идентификация доминирующей переменной.

Инженерная последовательность выполнения расчётов следующая:

- 1) задание типа предельного состояния, класса ответственности и срока эксплуатации выбранного сооружения;
- 2) выбор референсного уровня надёжности и коэффициентов  $\gamma_f(T_{ref})$ ,  $\gamma_m(T_{ref})$ ;
- 3) вычисление  $\beta_{eq}(T)$  по условию равенства суммарного риска за срок  $T$  и  $T_{ref}$ ;

- 4) определение коэффициентов чувствительности  $\alpha_R$  и  $\alpha_S$  (используя процедуру метода FORM либо по типовым значениям);
- 5) пересчет  $\gamma_f(T)$ ,  $\gamma_m(T)$  по формулам (5) - (6);
- 6) при оценке существующих сооружений — учет апостериорной надежности (факт безотказной работы до момента обследования) через снижение целевого  $\beta$  на величину порядка 0,2–0,3 и повторный пересчет  $\gamma$ .

Предварительные расчёты, выполненные по представленной методике, показывают, что для климатических нагрузок (снег, ветер) при уменьшении срока эксплуатации с 50 до 10–15 лет расчетные  $\gamma_f(T)$  могут быть снижены на 10–20%, а при 5–10 годах — до 15–30%; для постоянных нагрузок и  $\gamma_m$  изменения обычно невелики.

### 3. Результаты исследования и их анализ

Рассмотрим переменную климатическую нагрузку, для которой в расчетах по СП 20.13330 типично принимается  $\gamma_f(50)=1,4$  при  $T_{ref}=50$  лет. Примем целевой индекс надежности для 50-летнего периода  $\beta_{50}=3,8$  (класс надежности RC2 по EN 1990) и допустимую суммарную вероятность отказа  $P_{f,ref}(50) = \Phi(-3,8) \approx 7,23 \cdot 10^{-5}$ . Эквивалентный годовой индекс  $\beta_{eq}(50)$  определяют из приближения  $P_{f,1} \approx P_f(50)/50$ . Для  $T=30, 15, 10$  и 5 лет при сохранении  $P_f(T)=P_f(50)$  получаем меньший  $\beta_{eq}(T)$  и, соответственно, меньший  $\gamma_f(T)$ . Для иллюстрации примем типовые параметры для доминирующей переменной нагрузки:  $\alpha_S=0,9$ ;  $v_S=0,5$  ( $\sigma_{lnS}$  по (4)). Результаты пересчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Пример пересчета коэффициента надежности по снеговой нагрузке при сохранении суммарно допустимого риска

T, лет	$\beta_{eq}(T)$	$\gamma_f(T)/\gamma_f(50)$	$\gamma_f(T)$ при $\gamma_f(50)=1,4$
50	4.678	1.000	1.400
30	4.572	0.956	1.338
15	4.425	0.898	1.257
10	4.337	0.865	1.211
5	4.182	0.810	1.134

Как видно по результатам, приведённым в таблице 1, метод даёт ожидаемые результаты: при уменьшении срока эксплуатации получаем чуть меньшие значения частных коэффициентов. При этом, если по формулам произвести вычисления на больший срок, то получим чуть большие значения коэффициентов надёжности. При этом всё это происходит при неизменном принятом «интегральном» риске.

Данную методику следует применять в случаях, когда требуется согласованная корректировка уровня нормативного запаса под заданный срок эксплуатации без выхода за рамки расчета по предельным состояниям. Она, естественно, подходит для расчётного обоснования временных сооружений, модульных объектов, а также для задач продления ресурса при наличии данных обследований и мониторинга.

Ограничения определяются допущениями модели: независимость годовых максимумов, выбор вероятностных моделей (логнормальность), точность  $\alpha$ -коэффициентов и статистических параметров, а также корректность выделения доминирующего механизма отказа. Для систем с несколькими конкурирующими механизмами отказа рекомендуется применять модели, учитывающие системную надежность и/или моделирование, например, методами Монте-Карло, или применение суррогатных моделей.

### 4. Заключение

- 1) Рассмотрены современные вероятностные подходы к обеспечению надежности сооружений и их отражение в международных нормативных системах.
- 2) Предложена инженерная методика учета заданного срока эксплуатации  $T$  в рамках полувероятностного расчета за счет пересчета  $\beta_{eq}(T)$  и корректировки частных коэффициентов  $\gamma_f$  и  $\gamma_m$ .

3) Для климатических нагрузок при  $T \approx 10-15$  лет  $\gamma_f$  может быть снижен на  $\sim 10-20\%$  при сохранении суммарно допустимого риска; для  $\gamma_m$  корректировки малы (и могут быть уменьшены дополнительным учётом технологических особенностей производства, как это сделано, например, в СТО 7746710-001-2025).

4) Методика может служить основой для разработки рекомендаций/приложений к нормативным документам РФ по расчёту на заданный срок эксплуатации и оценке остаточного ресурса.

## 5. Благодарности

Данная работа была реализована в рамках Программы развития НИУ МГСУ на 2025–2036 годы в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2015.
2. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. М.: Минстрой России, 2016 (с изм.).
3. Федеральный закон № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». 30.12.2009 (с изм.).
4. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. М.: АСВ, 2010.
5. Ведяков И.И., Полевода И.И. Надежность строительных конструкций и расчет по предельным состояниям. М.: АСВ, 2016.
6. Перельмутер А.В., Кабанцев О. В., Пичугин С. Ф. Основы метода расчетных предельных состояний – М.: издательство СКАД СОФТ, издательство АСВ, 2019 – 240 с.
7. EN 1990:2002+A1:2005. Eurocode — Basis of structural design. CEN, Brussels.
8. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures. ISO, Geneva.
9. JCSS. Probabilistic Safety Code. Joint Committee on Structural Safety, 2001 (online).
10. ISO 13822:2010. Bases for design of structures — Assessment of existing structures. ISO, Geneva.
11. ISO 15686-1:2011. Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework. ISO, Geneva.
12. ISO 16204:2012. Durability — Service life design of concrete structures. ISO, Geneva.
13. fib Model Code 2010. Final draft. Fédération internationale du béton (fib), 2013.
14. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods. Wiley, 2007.
15. Nowak A.S., Collins K.R. Reliability of Structures. 2nd ed. CRC Press, 2012.
16. Melchers R.E., Beck A.T. Structural Reliability Analysis and Prediction. 3rd ed. Wiley, 2018.
17. Rackwitz R. Reliability analysis: a review and some perspectives // Structural Safety. 2001. Vol. 23. No. 4. Pp. 365–395.
18. Der Kiureghian A., Ditlevsen O. Aleatory or epistemic? Does it matter? // Structural Safety. 2009. Vol. 31. No. 2. Pp. 105–112.
19. Sudret B. Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions // Probabilistic Engineering Mechanics. 2008. Vol. 23. Nos. 2–3. Pp. 245–259.
20. Straub D. Reliability updating with equality information // Probabilistic Engineering Mechanics. 2011. Vol. 26. No. 2. Pp. 254–258.
21. Andrieu-Renaud C., Sudret B., Lemaire M. The PHI2 method: a way to compute time-variant reliability // Reliability Engineering & System Safety. 2004. Vol. 84. No. 1. Pp. 75–86. DOI: 10.1016/j.ress.2004.06.002.
22. Frangopol D.M., Soliman M. Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions // Structure and Infrastructure Engineering. 2016. Vol. 12. No. 1. Pp. 1–20.
23. European Commission, Joint Research Centre. Eurocodes: background and applications. Handbook series (reliability backgrounds). 2005 (PDF).
24. Helland S. Service life design of concrete structures: opportunities and challenges // Structural Concrete. 2013. Vol. 14. No. 4. Pp. 279–286.
25. European Commission, Joint Research Centre. Reliability background of the Eurocodes: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2024. DOI: 10.2760/9482837. JRC139110 (EUR 40072).
26. Joint Research Centre. Overview of the evolution EN 1990: Eurocode 0 — Basis of structural design. Issue 1 dated 15.10.2020. 2020 (PDF).
27. Formichi P., Landi L., Croce P. A consistent approach to the calibration of partial factors for permanent and variable loads // Structure and Infrastructure Engineering. 2023. Vol. 21. No. 10. Pp. 1695–1709. DOI: 10.1080/15732479.2023.2290704.

28. Надольский В.В. Метод коэффициентов надежности с регулируемыми значениями для проектирования стальных конструкций // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. № 9. С. 1444–1453. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.9.1444-1453.
29. Соловьёв С.А., Копейкин О.Е., Соловьёва А.А. Вероятностный метод проектирования стальных ферм на заданный уровень надежности и долговечности // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. № 5. С. 655–666. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.5.655-666.
30. Fernández Ruiz M., Tanner P., Martí-Herrero J., et al. Designing new structures and assessing existing ones: a discussion from the perspective of reliability // Structures. 2025. Vol. 70. 107108. DOI: 10.1016/j.istruc.2025.107108.
31. Su J., Zhang J., Caprani C.C., Zhou J. A practical framework for determining target reliability indices for the assessment of existing structures based on risk-informed decision-making // Structural Safety. 2025. Vol. 114. 102583. DOI: 10.1016/j.strusafe.2025.102583.
32. Pandey M.D., Polset A., Feng M.Q., et al. Life safety in the reliability-based design and assessment of structures // Structural Safety. 2025. Vol. 113. 102453. DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102453.
33. Chen C., Wang C., Zhao X., et al. Gaussian process-based Bayesian updating for time-dependent reliability assessment of aging bridges // Probabilistic Engineering Mechanics. 2025. Vol. 81. 103820. DOI: 10.1016/j.probengmech.2025.103820.
34. Wang C., Huang Y., Zhang K., et al. Reliability-based analysis and design of offshore wind turbine support structures: a comprehensive review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161. 112250. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112250.
35. Cheng K., Weng G., Cheng Z. Influence of load partial factors adjustment on reliability design of RC frame structures in China // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Article 7260. DOI: 10.1038/s41598-023-34241-5.

## REFERENCES

1. GOST 27751–2014. Reliability of building structures and foundations. General provisions. Moscow: Standartinform; 2015. (In Russ.)
2. \*SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated edition of SNiP 2.01.07-85\*\*.\* Moscow: Minstroy of Russia; 2016. (In Russ.)
3. Federal Law No. 384-FZ. Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures. 30 Dec 2009. (In Russ.)
4. Raizer V.D. Theory of Reliability of Structures. Moscow: ASV; 2010. (In Russ.)
5. Vedyakov I.I., Polevoda I.I. Reliability of Building Structures and Limit State Design. Moscow: ASV; 2016. (In Russ.)
6. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V., Pichugin S.F. Fundamentals of the method of calculated limit states. Moscow: SKAD SOFT Publishing House, ASV Publishing House; 2019. 240 p. (In Russ.)
7. \*EN 1990:2002+A1:2005. Eurocode — Basis of structural design.\* Brussels: CEN.
8. ISO 2394:2015. General principles on reliability for structures. Geneva: ISO.
9. JCSS. Probabilistic Model Code. Joint Committee on Structural Safety; 2001.
10. ISO 13822:2010. Bases for design of structures — Assessment of existing structures. Geneva: ISO.
11. ISO 15686-1:2011. Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework. Geneva: ISO.
12. ISO 16204:2012. Durability — Service life design of concrete structures. Geneva: ISO.
13. fib Model Code 2010. Final draft. Fédération internationale du béton (fib); 2013.
14. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods. Wiley; 2007.
15. Nowak A.S., Collins K.R. Reliability of Structures. 2nd ed. CRC Press; 2012.
16. Melchers R.E., Beck A.T. Structural Reliability Analysis and Prediction. 3rd ed. Wiley; 2018.
17. Rackwitz R. Reliability analysis: a review and some perspectives. Structural Safety. 2001;23(4):365–395.
18. Der Kiureghian A., Ditlevsen O. Aleatory or epistemic? Does it matter? Structural Safety. 2009;31(2):105–112.
19. Sudret B. Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. Probabilistic Engineering Mechanics. 2008;23(2–3):245–259.
20. Straub D. Reliability updating with equality information. Probabilistic Engineering Mechanics. 2011;26(2):254–258.
21. Andrieu-Renaud C., Sudret B., Lemaire M. The PHI2 method: a way to compute time-variant reliability. Reliability Engineering & System Safety. 2004;84(1):75–86. doi:10.1016/j.res.2004.06.002.
22. Frangopol D.M., Soliman M. Life-cycle of structural systems: recent achievements and future directions. Structure and Infrastructure Engineering. 2016;12(1):1–20.
23. European Commission, Joint Research Centre. Eurocodes: background and applications. Handbook series (reliability backgrounds). 2005.
24. Helland S. Service life design of concrete structures: opportunities and challenges. Structural Concrete. 2013;14(4):279–286.

25. Vrouwenvelder T., Dimova S.L., Sousa M.L., et al. *Reliability background of the Eurocodes: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2024. doi:10.2760/9482837. JRC139110 (EUR 40072).
26. Joint Research Centre. *Overview of the evolution EN 1990: Eurocode 0 — Basis of structural design*. Issue 1 dated 15.10.2020. 2020.
27. Formichi P., Landi L., Croce P. A consistent approach to the calibration of partial factors for permanent and variable loads. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2023;21(10):1695–1709. doi:10.1080/15732479.2023.2290704.
28. Nadolski V.V. Adjustable partial factor method for design of steel structures. *Vestnik MGSU*. 2024;19(9):1444–1453. doi:10.22227/1997-0935.2024.9.1444-1453. (In Russ.)
29. Solovyev S.A., Kopeykin O.E., Solovyeva A.A. Probabilistic design of steel trusses for a given reliability and durability. *Vestnik MGSU*. 2025;20(5):655–666. doi:10.22227/1997-0935.2025.5.655-666. (In Russ.)
30. Fernández Ruiz M., Tanner P., Martí-Herrero J., et al. Designing new structures and assessing existing ones: a discussion from the perspective of reliability. *Structures*. 2025;70:107108. doi:10.1016/j.istruc.2025.107108.
31. Su J., Zhang J., Caprani C.C., Zhou J. A practical framework for determining target reliability indices for the assessment of existing structures based on risk-informed decision-making. *Structural Safety*. 2025;114:102583. doi:10.1016/j.strusafe.2025.102583.
32. Pandey M.D., Polset A., Feng M.Q., et al. Life safety in the reliability-based design and assessment of structures. *Structural Safety*. 2025;113:102453. doi:10.1016/j.strusafe.2024.102453.
33. Chen C., Wang C., Zhao X., et al. Gaussian process-based Bayesian updating for time-dependent reliability assessment of aging bridges. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2025;81:103820. doi:10.1016/j.probenmech.2025.103820.
34. Wang C., Huang Y., Zhang K., et al. Reliability-based analysis and design of offshore wind turbine support structures: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;161:112250. doi:10.1016/j.rser.2022.112250.
35. Cheng K., Weng G., Cheng Z. Influence of load partial factors adjustment on reliability design of RC frame structures in China. *Scientific Reports*. 2023;13:7260. doi:10.1038/s41598-023-34241-5.

#### Информация об авторах

##### Смирнов Владимир Александрович

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

канд. техн. наук, доц., доцент кафедры Строительной и Теоретической Механики, заведующий Лабораторией Динамики Сооружений НИИ ЭМ НИУ МГСУ

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

#### Information about authors

##### Smirnov Vladimir A.

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

candidate in tech. sc., associated prof. of the dep. of structural and theoretical mechanics, head of Structural Dynamic Lab.

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

Статья поступила в редакцию 17.01.2026  
Одобрена после рецензирования 08.02.2026  
Принята к публикации 13.02.2026

The article was submitted 17.01.2026  
Approved after reviewing 08.02.2026  
Accepted for publication 13.02.2026

ВУ НГОК ТУЕН<sup>1</sup>, Д.Н. БАСОВА<sup>1</sup>, М.Д. МАСЛЕННИКОВ<sup>1</sup>, ЛЕ МИНЬ ТУАН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), г. Москва, Россия

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СДВИГА НА ПРОГИБ И КОРОБЛЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ КОНСОЛЬНОЙ БАЛКИ ПРИ ПРЯМОМ ИЗГИБЕ

*Аннотация.* В данном исследовании представлен полуобратный метод определения напряжений в консольной балке прямоугольного сечения с использованием алгебраических полиномов функции. В качестве функции напряжения выбран полином 3-й степени, коэффициенты которого определяются исходя из граничных условий задачи. Для определения перемещений приняли закон Гука, из которого выразили деформации через перемещения по формулам Коши. Исследовано влияние деформаций сдвига на прогибы и коробление поперечного сечения при прямом изгибе. Установлено, что для балок с соотношением высоты поперечного сечения к пролету  $h/l < 1/5$ , влияние сдвигов на деформированное состояние балки незначительно. Также произвели сравнительный анализ аналитических результатов расчета с результатами численного моделирования в программном комплексе Лира САПР.

*Ключевые слова:* функция напряжений эри, консольная балка, аналитическое решение, полином, полуобратный метод.

VU NGOK TUYEN<sup>1</sup>, D.N. BASOVA<sup>1</sup>, M.D. MASLENNIKOV<sup>1</sup>, LE MINH TUAN<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>National Research University Higher School of Economics (HSE), Moscow, Russia

## INFLUENCE OF SHEAR DEFORMATIONS ON DEFLECTION AND BARKING OF THE CROSS SECTION OF A CANTILIZER BEAM UNDER DIRECT BENDING

*Annotation.* This study presents a semi-inverse method for determining stresses in a rectangular cantilever beam using algebraic polynomials of a function. A 3rd degree polynomial was chosen as a stress function, the coefficients of which are determined based on the boundary conditions of the problem. To determine the displacements, Hooke's law was adopted, from which deformations were expressed through displacements using the Cauchy formulas. The influence of shear deformations on deflections and buckling of the cross section under direct bending was studied. It has been established that for beams with a ratio of cross-sectional height to span  $h/l < 1/5$ , the influence of shears on the deformed state of the beam is insignificant. We also carried out a comparative analysis of the analytical calculation results with the results of numerical modeling in the Lira CAD software package.

*Keywords:* stress function, cantilever beam, analytical solution, polynomial, semi-reverse method.

## **1. Введение**

При решении задач теории упругости необходимо определить пятнадцать неизвестных функций, включающих в себя: шесть компонентов тензора напряжений, шесть компонент тензора деформаций и три компоненты вектора перемещений. Для этого необходимо решить сложную систему уравнений теории упругости в декартовых координатах, состоящую из девяти дифференциальных и шести алгебраических уравнений. В силу сложности полной системы уравнений нельзя найти общее решение, которое было бы справедливо для всех задач теории упругости, встречающихся на практике.

Существуют различные способы уменьшения количества уравнений теории упругости. Один из них заключается в рассмотрении неизвестной функции в виде трех перемещений  $u$ ,  $v$ ,  $w$ . При таком подходе систему уравнений теории упругости можно сократить до трех обыкновенных дифференциальных уравнений относительно указанных компонентов перемещений (уравнения Ламе) [1–3].

Кроме того, шесть компонент тензора напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  также можно считать неизвестными. Тогда для их определения потребуется использование шести дифференциальных уравнений Бельтрами-Митчелла [4–6].

Наряду с двумя упомянутыми выше подходами, задача теории упругости может быть решена и другими методами, такими как смешанный метод (неизвестной функцией являются одновременно перемещения и напряжения) и метод с использованием специальной функции (позволяющей определить напряжение и деформацию). Следует отметить, что последний метод (с использованием функции напряжения Эри) можно применять только в плоских задачах теории упругости [7–9].

В данной статье ограничимся исследованием только плоских задач теории упругости, поскольку они чаще встречаются в расчетах реальных конструкций. Решение задач изгиба консольной изотропной балки с приложенной на конце нагрузкой, балки на двух опорах под действием равномерно распределенной нагрузки были даны Тимошенко и Гудьером [10]. Лехницкий [11] изучал напряженное состояние анизотропных балок при растяжении, сдвиге, чистом изгибе. Ахмед приводил численное исследование для защемленной балки под действием равномерно распределенной нагрузки [12]. Цзян получил аналитическое решение для анизотропной балки под действием равномерно распределенной нагрузки [13].

Кроме того, насколько известно автору, нет работы, в которой изучается влияние деформаций сдвига на прогиб и коробление поперечного сечения при прямом изгибе балки. Проведенные экспериментальные исследования на железобетонных балках при прямом изгибе показали, что поперечное сечение после нагружения перестает быть плоским и начинает искривляться [14–16]. Коробление проявляется заметно при постепенном увеличении нагрузки до предельного значения [17,18]. Причину коробления сечения можно объяснить тем, что помимо нормального напряжения в сечении возникают также касательные напряжения, сопровождающиеся сдвиговой деформацией [19,20]. Поэтому в данной статье автор для исследования влияния деформаций сдвига на консольную балку под действием сосредоточенной нагрузки (приложенной к ее концу) использует полуобратный метод с использованием алгебраических полиномов функции напряжения.

## **2. Модели и методы**

Рассмотрим консольную балку прямоугольного сечения с размерами  $b \times h$ , нагруженную сосредоточенной силой  $P$  (Рисунок 1). В этом случае можно считать, что балка работает в плоском напряженном состоянии, то есть:

$$\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 ; \sigma_x = \sigma_x(x, y) ; \sigma_y = \sigma_y(x, y) ; \tau_{xy} = \tau_{xy}(x, y). \quad (1)$$

Пренебрегая собственным весом балки, т.е. объемные силы в направлении  $x$  и направлении  $y$  равны 0. Выберем функцию напряжения Эри  $\varphi(x, y)$ , которую нужно найти в полиномиальном виде следующим образом:

$$\varphi(x, y) = \frac{C_1}{6} y^3 + \frac{C_2}{6} xy^3 - C_3 xy, \quad (2)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  — неизвестные постоянные множители. Поскольку степень полинома (2) меньше четырех, функция напряжений Эри тождественно удовлетворяет бигармоническому уравнению (3) для всех значений  $C_1, C_2, C_3$ :

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = 0. \quad (3)$$

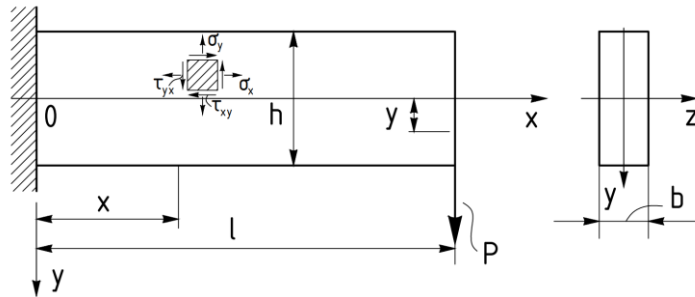


Рисунок 1 – Расчетная схема изгиба консольной балки с силой, приложенной на конце

Напряжения определяются на основе функции напряжения  $\varphi(x, y)$  следующим образом:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}. \quad (4)$$

Подставив выражение функции напряжения (2) в (4), получим:

$$\sigma_x = C_1 y + C_2 xy; \quad \sigma_y = 0; \quad \tau_{xy} = -\frac{C_2 y^2}{z} + C_3. \quad (5)$$

Коэффициенты  $C_1, C_2, C_3$  определим из граничных условий на контуре балки. На нижней и верхней ненагруженных гранях имеем:

$$y = \pm \frac{h}{2}; \quad \sigma_y = 0; \quad \tau_{xy} = 0. \quad (6)$$

Первое условие ( $\sigma_y = 0$ ) выполняется тождественно, а из второго условия имеем:

$$C_3 = C_2 \frac{h^2}{8}. \quad (7)$$

Граничные условия на правом торце балки записываются в интегральном виде:

$$x = l; \quad \sigma_x = 0; \quad \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yx} b dy = P. \quad (8)$$

Из первого условия (8) находим:

$$C_1 y + C_2 l y = 0 \quad \text{или} \quad C_1 = -C_2 l. \quad (9)$$

Из второго условия в интегральной форме (8) имеем:

$$\int_{-h/2}^{h/2} \left( -\frac{C_2}{2} y^2 + C_2 \right) b dy = P. \quad (10)$$

Выполнив интегрирование, находим:

$$2 \left[ -\frac{C_2}{6} \left( \frac{h}{2} \right)^3 + C_3 \frac{h}{2} \right] = \frac{P}{b}. \quad (11)$$

Решая систему уравнений (7) и (11), получим значения  $C_2$  и  $C_3$ :

$$C_2 = \frac{12}{bh^3} P = \frac{P}{J_z} ; C_3 = \frac{Ph^2}{8J_z} . \quad (12)$$

Подставив значение  $C_2$  из уравнения (12) в (9), находим коэффициент  $C_1$  функции напряжения Эри:

$$C_1 = -\frac{Pl}{J_z} . \quad (13)$$

Подставив коэффициенты  $C_1, C_2, C_3$  из уравнения (12) и (13) в (5), получим формулу для напряжений:

$$\sigma_x = -\frac{Pl}{J_z} y + \frac{P}{J_z} xy ; \sigma_y = 0 ; \tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{Ph^2}{8J_z} - \frac{P}{2J_z} y^2 . \quad (14)$$

Теперь определим смещение  $u, v$  на основе соотношения Коши и закона Гука:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu \sigma_y) = -\frac{P}{EJ_z} (l-x) y ; \quad (15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = \varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu \sigma_x) = \frac{\nu P}{EJ_z} (l-x) y ; \quad (16)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \gamma_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} = \frac{(1+\nu)P}{EJ_z} \left( \frac{h^2}{4} - y^2 \right) . \quad (17)$$

Интегрируя уравнение (15) по переменной  $x$  и (16) по переменной  $y$ , получим:

$$u = -\frac{P}{EJ_z} \left( lxy - \frac{1}{2} x^2 y \right) + f_1(y) ; \quad (18)$$

$$v = \frac{\nu P}{2EJ_z} (ly^2 - xy^2) + f_2(x) ; \quad (19)$$

где  $\varphi_1(y)$  и  $\varphi_2(x)$  — произвольные функции.

Подставив (18) и (19) в (17), получим:

$$\left[ f'_2(x) - \frac{P}{EJ_z} \left( lx - \frac{x^2}{2} \right) \right] + \left[ f'_1(y) + \frac{(2+\nu)P}{2EJ_z} y^2 \right] = \frac{(1+\nu)Ph^2}{4EJ_z} . \quad (20)$$

В уравнении (20) правая часть — константа, не зависящая от координат  $x, y$ ; выражение в первой квадратной скобке зависит только от переменной  $x$ , а во второй квадратной скобке зависит только от переменной  $y$ . Поскольку  $x, y$  являются двумя независимыми переменными, уравнение (20) удовлетворяется только в том случае, если формулы в квадратных скобках являются константами, то есть:

$$f'_2(x) - \frac{P}{EJ_z} \left( lx - \frac{x^2}{2} \right) = C_4 ; \quad (21)$$

$$f'_1(y) + \frac{(2+\nu)P}{2EJ_z} y^2 = C_5 . \quad (22)$$

Интегрируя два приведенных выше выражения, находим функции  $f_1(y)$  и  $f_2(x)$ :

$$f_2(x) = \frac{P}{EJ_z} \left( \frac{lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + C_4 x + C_6 ; \quad (23)$$

$$f_1(y) = -\frac{(2+\nu)P}{6EJ_z} y^3 + C_5 y + C_7 . \quad (24)$$

Из формул (23) и (24) выражения для перемещения запишутся как:

$$u = \frac{P}{EJ_z} \left( -lxy + \frac{x^2y}{2} - \frac{(2+\nu)}{6} y^3 \right) + C_5y + C_7; \quad (25)$$

$$v = \frac{P}{2EJ_z} \left( \nu ly^2 - \nu xy^2 + lx^2 - \frac{x^3}{3} \right) + C_4x + C_6. \quad (26)$$

Для определения констант  $C_7$ ,  $C_6$  используем граничное условие в точке  $O$  балки, т.е.:  
 $x = 0, y = 0, u = v = 0.$  (27)

Подставив приведенные выше условия в формулу (25) и (26), получим  $C_6 = C_7 = 0$  Для определения константы  $C_4$  воспользуемся условием, что в заделке угол поворота между касательной и изогнутой оси балки равняется нулю, то есть:

$$x = 0, y = 0, \frac{\partial u}{\partial y} = 0. \quad (28)$$

Получим  $C_4 = 0$ . Согласно формуле (20), имеем:

$$C_4 + C_5 = \frac{(1+\nu)Ph^2}{4EJ_z}. \quad (29)$$

Подставив  $C_4 = 0$  в (29), получим значение  $C_5$ :

$$C_5 = \frac{(1+\nu)Ph^2}{4EJ_z}. \quad (30)$$

Таким образом, формулы определения перемещений имеют вид:

$$u = \frac{P}{EJ_z} \left( -lxy + \frac{x^2y}{2} - \frac{(2+\nu)}{6} y^3 \right); \quad (31)$$

$$v = \frac{P}{2EJ_z} (\nu ly^2 - \nu xy^2) + lx^2 - \frac{x^3}{3} + \frac{(1+\nu)h^2}{2} x. \quad (32)$$

Как видно из формулы (31), перемещение  $u$  нелинейно зависит от  $y$  и, следовательно, поперечные сечения балки, в том числе и в заделке не остаются плоскими.

В формуле (32) приняв  $y = 0$ , получим уравнение изогнутой оси балки:

$$v(x) = \frac{P}{EJ_z} \left( \frac{lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + \frac{(1+\nu)Pl^2}{4EJ_z} \left( \frac{h}{l} \right)^2 x. \quad (33)$$

При  $x = l$  формула (33) определяет значение прогиба балки:

$$v(l) = \frac{Pl^3}{3EJ_z} + \frac{(1+\nu)Pl^3}{4EJ_z} \left( \frac{h}{l} \right)^2. \quad (34)$$

Первые слагаемые в формулах (34) совпадают с выражениями для прогибов консольной балки, полученными в элементарной теории изгиба, основанной на гипотезе плоских сечений, а вторые, имеющие порядок величины  $(h/l)^2$  по сравнению с первыми, учитывают влияние деформаций сдвига на прогибы.

### 3. Результаты исследования и их анализ

Для анализа влияния сдвиговой деформаций сдвига на прогиб и коробление поперечного сечения консольной балки, нагруженной сосредоточенной силой на ее конце, а также для оценки точности полученных расчетных формул рассмотрим следующий простой пример. Моделируем консольную балку длиной 3 м, один конец жестко зашпелен, а в другом приложена сосредоточенная нагрузка 3 кН. Сечение балки прямоугольное шириной  $b = 200$  мм и высотой  $h = 300$  мм. Балка изготовлена из изотропного упругого материала со следующими параметрами: модуль упругости  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ . Для численного моделирования работы вышеуказанной консольной балки используем

программный комплекс Лира САПР, реализованный на базе метода конечных элементов (МКЭ). Триангулируем консольную балку на кубические конечные элементы (КЭ) с размерами 0,25x0,25x0,25 м. Тип элементов выбран универсальный пространственный восьмиузловой изопараметрический – КЭ 36 (произвольный гексаэдр). Данный КЭ с тремя степенями свободы в узле предназначен для прочностного расчета континуальных объектов и массивных пространственных конструкций, он отлично подходит для моделирования рассмотренной выше задачи (Рисунок 2).

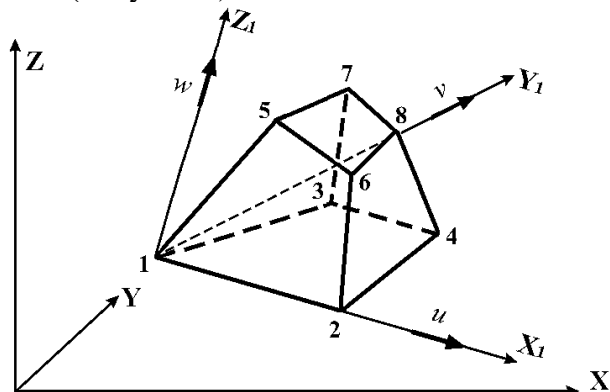


Рисунок 2 – Схематическое изображение КЭ 36 и последовательность нумерации его узлов

Конечно-элементная модель консольной балки показана на Рисунке 3. При этом сосредоточенная сила приложена в центр тяжести поперечного сечения свободного конца балки.

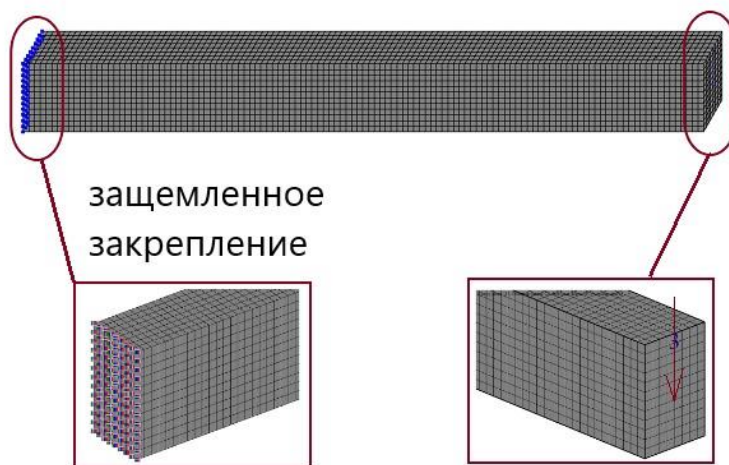


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель консольной балки нагруженной сосредоточенной силой на ее конце

После расчет получим напряженно-деформационное состояние балки. На Рисунке 4 изображена исходная и деформированная схема балки под действием нагрузки. Видно, что у конца балки с жестким закреплением перемещения точек сечения равно нулю. В поперечных сечениях, постепенно удаленных от заделки перемещения постепенно увеличиваются и достигают максимального значения на свободном конце балки.

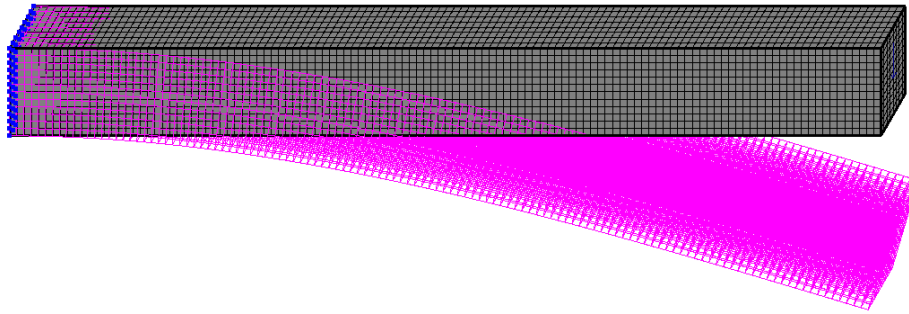


Рисунок 4 – Исходная и деформированная схема балки

Изополю перемещений в направлении сосредоточенной силы (по оси  $y$ ) представлено на Рисунке 5. В сечении приложения сосредоточенной силы перемещение по  $y$  достигает максимального значения и равно 0,301 мм.

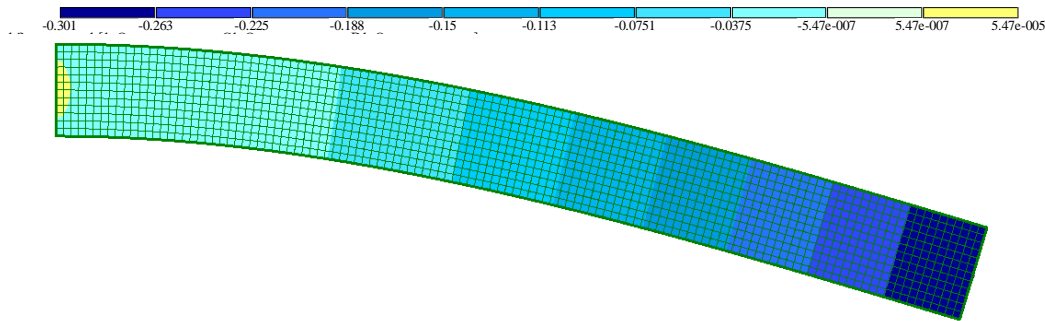


Рисунок 5 – Изополю перемещений по оси  $Oy$

На Рисунке 6 показана мозаика нормальных напряжений  $\sigma_x$  балки. Видно, что нормальное напряжение положительное в верхней половине балки и отрицательное в нижней половине. У средних волокон нормальное напряжение  $\sigma_x$  равно 0 (нейтральная плоскость). Чем дальше от нейтральной плоскости положение изучаемой точки, тем абсолютная величина нормального напряжения  $\sigma_x$  больше. Максимального значения  $\sigma_x$  достигает у верхних и нижних волокон поперечного сечения балки. Кроме того, видно, что напряжения в верхних и нижних волокнах постепенно уменьшаются вдоль оси балки с увеличением координат  $x$ . Наибольшее значение нормальных напряжений получили в заделке на верхних и нижних волокнах сечения (3,1 МПа).

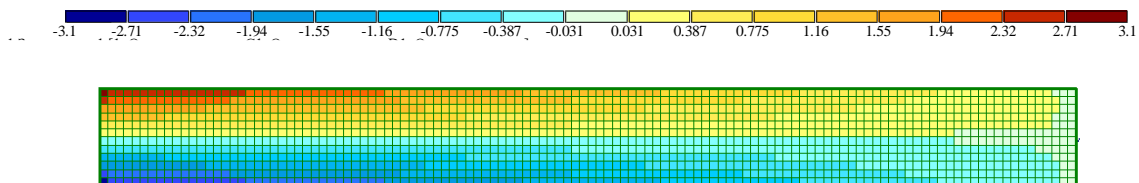


Рисунок 6 – Мозаика нормальных напряжений  $\sigma_x$

Распределение касательных напряжений  $\tau_{xy}$  представлено на Рисунке 7. В крайних зонах балки появляется концентрация напряжений. Данное явление выходит за рамки исследования статьи, поэтому рассмотрим только изменение касательных напряжения в сечениях вдали от конца балки. Видим, что напряжение  $\tau_{xy}$  меняется по высоте поперечного сечения балки. У верхних и нижних волокон касательное напряжение имеет наименьшее

значение (0,0776 МПа), у средних волокон касательное напряжение имеет наибольшее значение (0,0113 МПа).

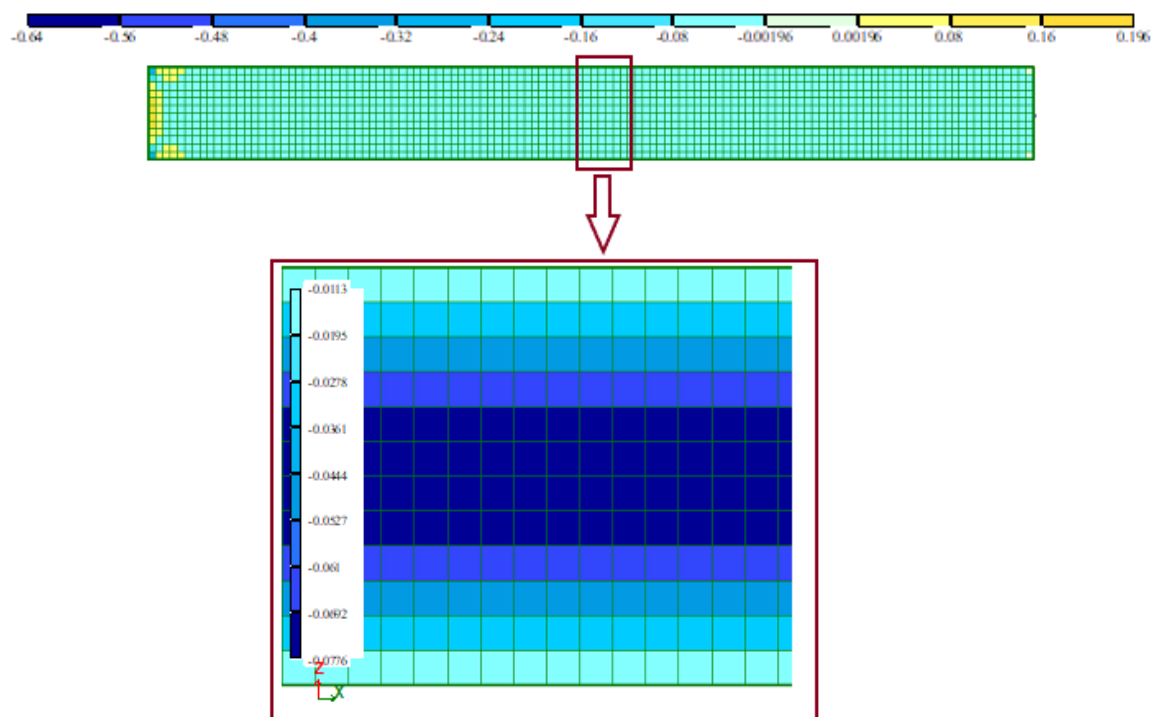


Рисунок 7 – Мозайка касательных напряжений  $\tau_{yx}$

Перемещение балки в направлении  $x$  рассмотрено на Рисунке 8. В частности, точки, расположенные над нейтральной плоскостью, будут иметь положительное перемещение. И наоборот, точки, расположенные ниже нейтральной плоскости, будут иметь отрицательное перемещение. Очевидно, что у нейтральной плоскости горизонтальное перемещение равно 0. В одном и том же сечении перемещение волокон вдали от нейтральной плоскости будет иметь наибольшую величину. По длине балки наибольшее горизонтальное перемещение достигается в конечном сечении, где приложена сосредоточенная сила ( $u_{\max} = 0,0223$  мм).

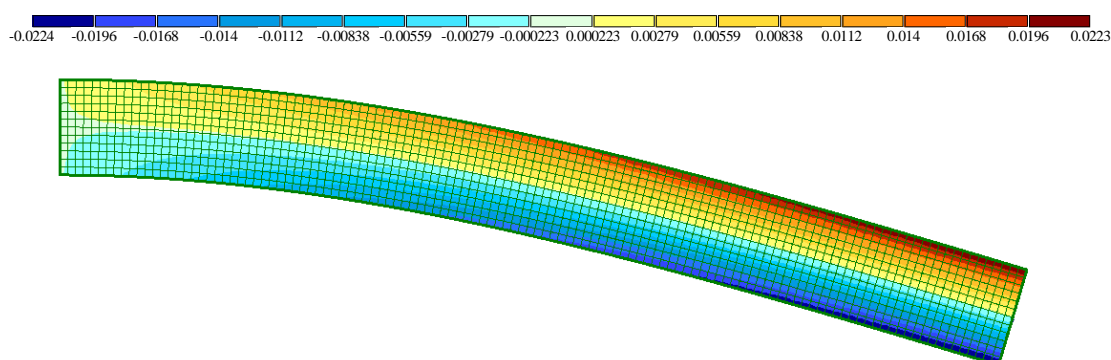


Рисунок 8 – Изополя перемещений по  $X$

Теперь сравним полученные результаты численного анализа с аналитическим решением, приведенным в данной статье. Рассмотрим три характерных поперечных сечения балки. Секция заделки 1-1 ( $x=0$ ), секция 2-2 в середине балки ( $x=1,5$ м) и секция 3-3 на конце

балки, где приложена сосредоточенная нагрузка ( $x=3\text{м}$ ). Величину нормальных напряжений на этих сечениях определяют путем подстановки  $x=0\text{ м}$ ,  $x=1,5\text{ м}$  и  $x=3\text{ м}$  в формулу (14):

$$\sigma_{x,1-1} = -\frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 3}{4,5 \cdot 10^{-4}} y + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^{-4}} 0 \cdot y = -20y [\text{МПа}]; \quad (35)$$

$$\sigma_{x,2-2} = -\frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 3}{4,5 \cdot 10^{-4}} y + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^{-4}} 1,5 \cdot y = -10y [\text{МПа}]; \quad (36)$$

$$\sigma_{x,3-3} = -\frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 3}{4,5 \cdot 10^{-4}} y + \frac{3 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^{-4}} 3 \cdot y = 0 [\text{МПа}]; \quad (37)$$

где  $J_z = \frac{bh^3}{12} = \frac{0,2 \cdot 0,3^3}{12} = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^4$ .

На основе трех приведенных выше формул (35) – (37) построим диаграмму напряжений в сечениях 1-1, 2-2, 3-3 (Рисунок 9,б). Сравнивая результаты расчета, полученные путем численного моделирования в программе Лира САПР (Рисунке 9,а) и аналитического решения, видно, что разница между результатами незначительна. В сечении 1-1 максимальное напряжение равно 3 МПа из теоретического расчета, при расчете по методу конечных элементов значение в этой же точке составило 3,1 МПа. Таким образом, разница между двумя приведенными результатами составляет всего 3%. Можно предположить, что аналогичные выводы будут для всех сечений балки.

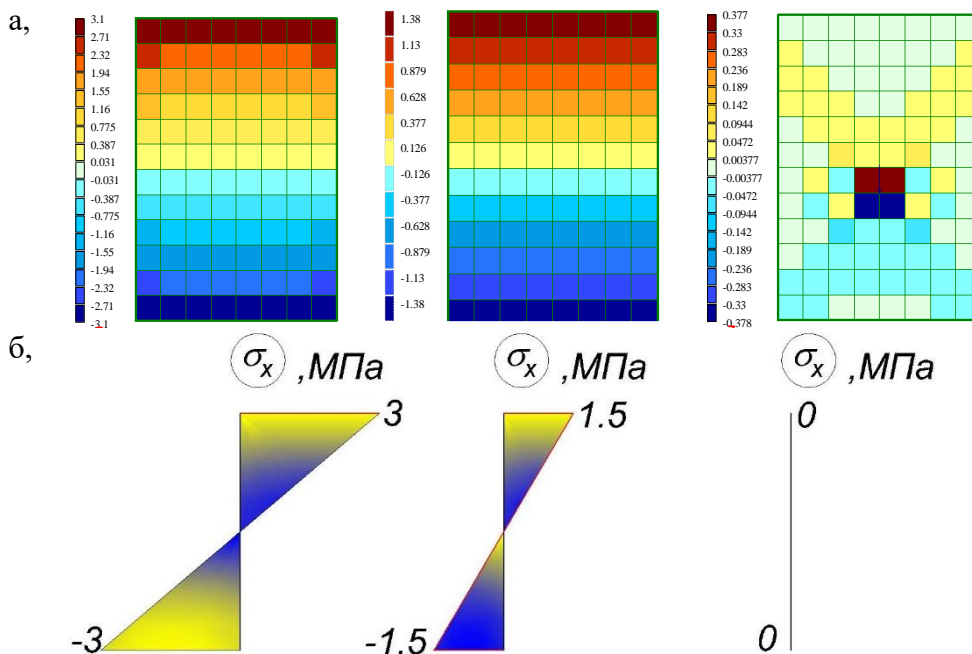


Рисунок 9 – Распределение нормальных напряжений в характерных сечениях балки (1-1, 2-2, 3-3): а) численный метод, б) аналитический метод

Касательные напряжения в балке определяются по формуле (14):

$$\tau_{xy} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3^2}{8 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4}} - \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4}} y^2 = 0,075 - \frac{10}{3} y^2. \quad (38)$$

Видно, что величина касательного напряжения не зависит от переменной  $x$ . То есть  $\tau_{xy}$  вдоль продольного волокна имеет постоянное значение. В направлении  $y$  (по высоте балки) касательное напряжение изменяется по параболическому закону. На рисунке 10 представлено распределение напряжений  $\tau_{xy}$ , рассчитанное численными методами и аналитическими методами. Установлено, что результаты численного метода близки к теоретическим

результатам только на участках, удаленных от торцов балки, поскольку в этих местах возникает концентрация напряжений.

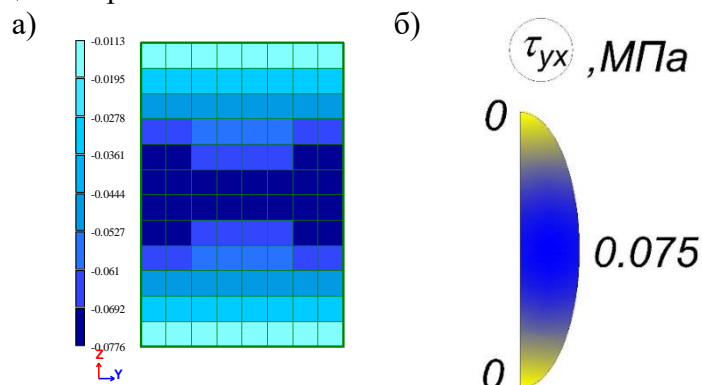


Рисунок 10 – Распределение касательных напряжений  $\tau_{xy}$ : а) численным методом, б) аналитический метод

Для проверки гипотезы плоских сечений, согласно теории сопротивления материалов, определим горизонтальное перемещение на участках 1-1, 2-2, 3-3 по формуле (31):

$$u_{1-1} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4}} \left( -3 \cdot 0 \cdot y + \frac{0^2 \cdot y}{2} - \frac{(2+0,3)}{6} y^3 \right) = -0,0000128 y^3, \quad (39)$$

$$u_{2-2} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4}} \left( -3 \cdot 1,5 \cdot y + \frac{1,5^2 \cdot y}{2} - \frac{(2+0,3)}{6} y^3 \right), \quad (40)$$

$$= -0,0000128 \cdot y \cdot (y^2 + 8,804)$$

$$u_{3-3} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4}} \left( -3 \cdot 3 \cdot y + \frac{3^2 \cdot y}{2} - \frac{(2+0,3)}{6} y^3 \right) \quad (41)$$

$$= -0,0000128 \cdot y \cdot (y^2 + 11,739).$$

Из теоретических формул (39) – (41) построим диаграмму деформирования сечений 1-1, 2-2, 3-3 (Рисунок 11,б). На Рисунке 11,а показаны результаты расчета горизонтального перемещения в направлении x методом конечных элементов. Заметим, что изменение перемещений по сечению, рассчитанное двумя вышеуказанными методами, отличается незначительно.

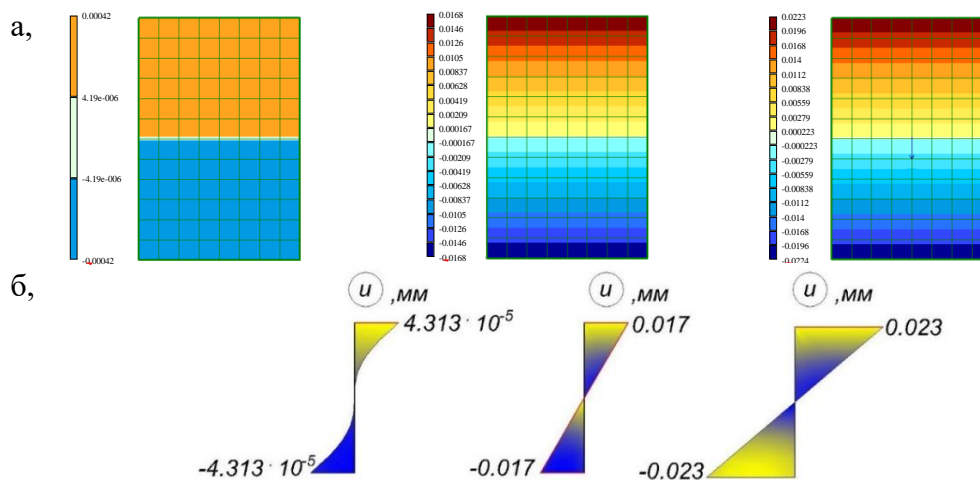


Рисунок 11 – Распределение перемещений в направлении x в характерных сечениях балки 1-1, 2-2, 3-3 соответственно: а) численное, б) аналитическое

Из формул (39) – (41) видно, что горизонтальное перемещение точек сечения зависит от координаты  $y$  по кубической функции, поэтому в общем случае сечение перестает быть плоским после приложения силы к свободному концу балки. Однако изменение перемещений на Рисунке 11,б показывает, что коробление сечения после приложения силы незначительно по сравнению с размерами сечения, и с относительной точностью можно принять гипотезу плоского сечения в теории изгиба балки.

Теоретический прогиб балки определяется подстановкой геометрических и механических характеристик балки в формулу (33):

$$v(x) = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4}} \left( \frac{3x^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + \frac{(1+0,3) \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2}{4 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4}} \left( \frac{0,3}{3} \right)^2 x \quad (42)$$

$$= -5,556 \cdot 10^{-6} x^3 + 5 \cdot 10^{-5} x^2 + 9,75 \cdot 10^{-7} x$$

На рисунке 12 изображено изменение прогиба балки, рассчитанного по формуле (33) и по методу конечных элементов. Заметим, что результаты этих двух методов практически не отличаются.

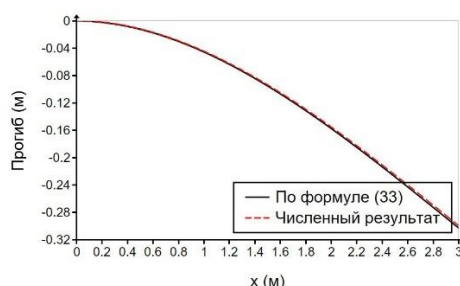


Рисунок 12 – Изменение прогиба балки по формуле (33) и по методу конечных элементов

Чтобы рассмотреть влияние сдвиговой деформации на прогиб балки, рассмотрим три случая балок с разными соотношениями  $h/l$ . Случай 1 – балка сечения  $b \times h = 200 \times 300$  мм ( $h/l = 300/3000 = 1/10$ ); Случай 2 – увеличиваем высоту балки до 600 мм, тогда  $h/l = 600/3000 = 1/5$ ; Случай 3 – высота сечения равна 1000, то есть  $h/l = 1000/3000 = 1/3$ . Подставив приведенные выше параметры в первое слагаемое формулы (33), получим прогиб балки без учета сдвиговой деформации. Это значение прогиба представлено черной линией на Рисунке 13. Чтобы учесть влияние сдвиговой деформации, подставляем входные параметры во всю формулу (33) и получаем красную кривую прогиба на рисунке 13.

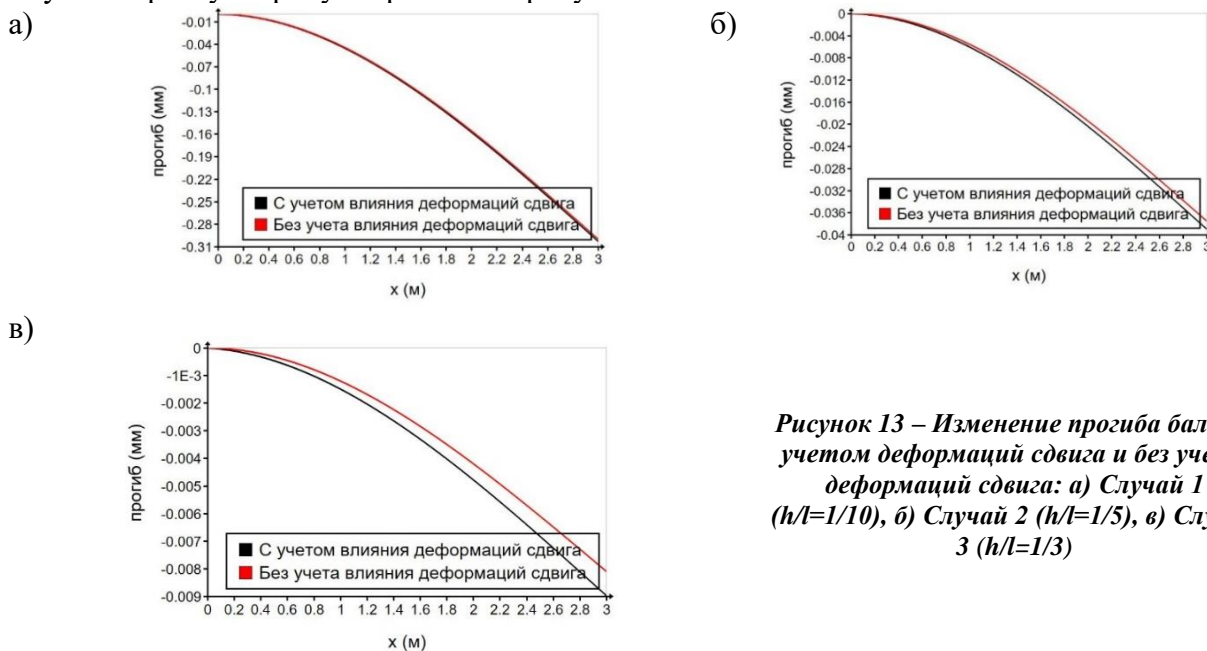


Рисунок 13 – Изменение прогиба балки с учетом деформаций сдвига и без учета деформаций сдвига: а) Случай 1 ( $h/l=1/10$ ), б) Случай 2 ( $h/l=1/5$ ), в) Случай 3 ( $h/l=1/3$ )

В трех вышеуказанных случаях черная линия всегда находится ниже красной линии. Это доказывает, что сдвиговая деформация способствует уменьшению прогиба балки. При небольшой высоте балки (соответствует случаю 1:  $h/l=1/10$ ) влияние сдвиговой деформации на прогиб балки незначительно. По мере увеличения высоты поперечного сечения балки расстояние между двумя приведенными выше кривыми увеличивается. По мере увеличения отношения  $h/l$  сдвиговая деформация оказывает более существенное влияние на прогиб балки.

При  $h/l < 1/5$  влиянием сдвиговой деформации на прогиб балки можно пренебречь. Напротив, для балок большой высоты (балка-стенка с  $h/l > 1/5$ ) учет деформаций сдвига способствует уменьшению полученного теоретического прогиба. Другими словами, это помогает более точно описать поведение балки большой высоты.

#### 4. Заключение

1. Применен полуобратный метод с использованием алгебраических полиномов функции напряжения для определения напряженно-деформированного состояния конструкции консольной балки прямоугольного сечения, нагруженной сосредоточенной силой на ее свободном конце.
2. Достоверность описанного метода проверена путем сравнения результатов расчета с численным методом (МКЭ), реализуемым программой «Ли́ра САПР».
3. Горизонтальное перемещение по направлению  $x$  получено из полуобратного метода подчиняется функции 3-го порядка. Следовательно, можно сделать вывод, что под действием сосредоточенной силы на конце консольной балки поперечное сечение перестает быть плоским, оно деформируется.
4. Показано, что сдвиговая деформация существенно влияет на прогиб балок при  $h/l > 1/5$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levin V.A., Podladchikov Y.Y., Zingerman K.M. An exact solution to the Lamé problem for a hollow sphere for new types of nonlinear elastic materials in the case of large deformations // *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2021. № 90.
2. Liu D., Li L. The coupling system of Navier–Stokes equations and elastic Navier–Lame equations in a blood vessel // *Numerical Methods for Partial Differential Equations*. 2020. № 5(36).
3. Miroshnikov V.Y. Stress State of an Elastic Layer with a Cylindrical Cavity on a Rigid Foundation // *International Applied Mechanics*. 2020. № 3(56). С. 372–381.
4. Nahirnyj T., Sasiadek M., Tchervinka K. Modeling the effect of surface roughness on mechanical fields in an elastic solid bounded by nominally flat surfaces // *International Journal of Solids and Structures*. 2024. № 302.
5. Trubitsyn V.P., Trubitsyn A.P. Comparative Analysis and Unified Derivation of Reissner's Equations for 2D Bending of Thick Plates and Timoshenko's Equations for Bending of Beams // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2024. № 2(60). С. 258–269.
6. Svetashkov A.A. et al. Variable separation method for solving boundary value problems of isotropic linearly viscoelastic bodies // *Acta Mechanica*. 2020. № 9(231). С. 3583–3606.
7. Nguyen-Hoang M., Becker W. Stress analysis of finite dimensions bolted joints using the Airy stress function // *International Journal of Solids and Structures*. 2021. № 224.
8. Jiang Q., Zhou Z., Chen J., Yang F. The method of fundamental solutions for two-dimensional elasticity problems based on the Airy stress function // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2021. № 130. С. 220–237.
9. Kumari S., Pardeep, Bandhu D. Stress analysis of an infinite plate with single hole by using Airy's stress function // *Materials Today: Proceedings*. 2022. № 62. С. 3289–3294.
10. Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. New York: McGraw Hill, 1970. 263 с.
11. Lekhnitskii S.G. *Anisotropic Plate*. New York: Gordon and Breach, 1968. 534 с.
12. Ahmed S.R., Idris B.M., Uddin M.W. Numerical solution of both ends fixed deep beams // *Computers & Structures*. 1996, № 61(1). С. 21–29.
13. Jiang A.M., Ding HJ. The analytical solutions for orthotropic cantilever beams (I): Subjected to surface forces // *Journal of Zhejinag University*. 2005, № 6A(2). С. 126–131.
14. Iakovenko A. I., Kolchunov I. V. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states // *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. №. 3(15).
15. Kolchunov V., Dem'yanov A., Protchenko M. The new hypothesis angular deformation and filling of diagrams in bending with torsion in reinforced concrete structures // *Journal of Applied Engineering*. 2021. №. 4(19). С. 972–979.

16. Poliotti M., Bairán J. M. B-spline sectional model for general 3D effects in reinforced concrete elements // *Engineering Structures*. 2020. №. 207.
17. Jiang C., Ding H., Gu X.L., Zhang W.P. Failure mode-based calculation method for bending bearing capacities of normal cross-sections of corroded reinforced concrete beams // *Engineering Structures*. 2022. №. 258.
18. Nasser H. et al. An experimental assessment of corrosion damage and bending capacity reduction of singly reinforced concrete beams subjected to accelerated corrosion // *Construction and Building Materials*. 2021. №. 286.
19. Kosior-Kazberuk M., Kochkarev D., Azizov T., Galinska T. Approximation Model of the Method of Design Resistance of Reinforced Concrete for Bending Elements // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. №. 181. C. 245–254. DOI:10.1007/978-3-030-85043-2\_23/TA.
20. Nuguzhinov Z.S., Bakirov Z.B., Vatin N.I., Bakirov M.Z., Kurokhtina I.A., Tokanov D.T., Khabi-dolda O. Stress Intensity Factor of Reinforced Concrete Beams in Bending // *Buildings*. 2021. № 7(11). DOI:10.3390/BUILDINGS11.

## REFERENCES

1. Levin V.A., Podladchikov Y.Y., Zingerman K.M. An exact solution to the Lamé problem for a hollow sphere for new types of nonlinear elastic materials in the case of large deformations. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2021. No. 90.
2. Liu D., Li L. The coupling system of Navier–Stokes equations and elastic Navier–Lame equations in a blood vessel. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*. 2020. Vol. 36. No. 5.
3. Miroshnikov V.Y. Stress State of an Elastic Layer with a Cylindrical Cavity on a Rigid Foundation. *International Applied Mechanics*. 2020. Vol. 56. No. 3. Pp. 372–381.
4. Nahimyj T., Szaśiadek M., Tchervinka K. Modeling the effect of surface roughness on mechanical fields in an elastic solid bounded by nominally flat surfaces. *International Journal of Solids and Structures*. 2024. No. 302.
5. Trubitsyn V.P., Trubitsyn A.P. Comparative Analysis and Unified Derivation of Reissner’s Equations for 2D Bending of Thick Plates and Timoshenko’s Equations for Bending of Beams. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2024. Vol. 60. No. 2. Pp. 258–269.
6. Svetashkov A.A. et al. Variable separation method for solving boundary value problems of isotropic linearly viscoelastic bodies. *Acta Mechanica*. 2020. Vol. 231. No. 9. Pp. 3583–3606.
7. Nguyen-Hoang M., Becker W. Stress analysis of finite dimensions bolted joints using the Airy stress function. *International Journal of Solids and Structures*. 2021. No.224.
8. Jiang Q., Zhou Z., Chen J., Yang F. The method of fundamental solutions for two-dimensional elasticity problems based on the Airy stress function. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2021. No.130. Pp. 220–237.
9. Kumari S., Pardeep, Bandhu D. Stress analysis of an infinite plate with single hole by using Airy’s stress function. *Materials Today: Proceedings*. 2022. No.62. Pp. 3289–3294.
10. Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. New York: McGraw Hill, 1970. 263 p.
11. Lekhnitskii S.G. *Anisotropic Plate*. New York: Gordon and Breach, 1968. 534 p.
12. Ahmed S.R., Idris B.M., Uddin M.W. Numerical solution of both ends fixed deep beams. *Computers & Structures*. 1996, Vol. 1. No.61. Pp. 21–29.
13. Jiang A.M., Ding HJ. The analytical solutions for orthotropic cantilever beams (I): Subjected to surfaceforces. *Journal of Zhejinag University*. 2005, Vol. 2. No.6A. Pp. 126–131.
14. Iakovenko A. I., Kolchunov I. V. The development of fracture mechanics hypotheses applicable to the calculation of reinforced concrete structures for the second group of limit states. *Journal of Applied Engineering Science*. 2017. Vol. 15. No. 3.
15. Kolchunov V., Dem’yanov A., Protchenko M. The new hypothesis angular deformation and filling of diagrams in bending with torsion in reinforced concrete structures. *Journal of Applied Engineering*. 2021. Vol. 19. No. 4. Pp. 972–979.
16. Poliotti M., Bairán J. M. B-spline sectional model for general 3D effects in reinforced concrete elements. *Engineering Structures*. 2020. No. 207.
17. Jiang C., Ding H., Gu X.L., Zhang W.P. Failure mode-based calculation method for bending bearing capacities of normal cross-sections of corroded reinforced concrete beams. *Engineering Structures*. 2022. No. 258.
18. Nasser H. et al. An experimental assessment of corrosion damage and bending capacity reduction of singly reinforced concrete beams subjected to accelerated corrosion. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 286.
19. Kosior-Kazberuk M., Kochkarev D., Azizov T., Galinska T. Approximation Model of the Method of Design Resistance of Reinforced Concrete for Bending Elements. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. No. 181. Pp. 245–254. DOI:10.1007/978-3-030-85043-2\_23/TA.
20. Nuguzhinov Z.S., Bakirov Z.B., Vatin N.I., Bakirov M.Z., Kurokhtina I.A., Tokanov D.T., Khabi-dolda O. Stress Intensity Factor of Reinforced Concrete Beams in Bending. *Buildings*. 2021. Vol. 11. No.7. DOI:10.3390/BUILDINGS11.

**Информация об авторах**

**Ву Нгок Туен**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
кандидат технических наук, доцент кафедры Фундаментального образования,  
E-mail: WuNgokTuen@gic.mgsu.ru

**Басова Дарья Николаевна**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
студентка кафедры Фундаментального образования,  
E-mail: dbasova822@gmail.com

**Масленников Максим Дмитриевич**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
студент кафедры Фундаментального образования,  
E-mail: maksimmaslennikov5@gmail.com

**Ле Минь Туан**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)», г. Москва, Россия,  
кандидат технических наук, доцент факультета гуманитарных наук,  
E-mail: architect290587@gmail.com

**Information about authors**

**Vu Ngoc Tuyen**

Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Fundamental Education,  
E-mail: WuNgokTuen@gic.mgsu.ru

**Basova Daria N.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,  
Student, Department of Fundamental Education,  
E-mail: dbasova822@gmail.com

**Maslennikov Maxim D.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia,  
Student, Department of Fundamental Education,  
E-mail: maksimmaslennikov5@gmail.com

**Le Minh Tuan**

National Research University "Higher School of Economics" (HSE University), Moscow, Russia,  
Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of Humanities,  
E-mail: architect290587@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19.01.2026  
Одобрена после рецензирования 08.02.2026  
Принята к публикации 10.02.2026

The article was submitted 19.01.2026  
Approved after reviewing 08.02.2026  
Accepted for publication 10.02.2026

В.С. ФЕДОРОВ<sup>1</sup>, П.А. МАТВИЕНКО<sup>1</sup><sup>1</sup>Российский университет транспорта, Москва, Россия

## ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННО НЕОДНОРОДНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Аннотация.* В современных условиях при оценке огнестойкости строительных конструкций невозможно ограничиваться использованием только стандартной температурно-временной кривой пожара, поскольку она не отражает нестационарный и пространственно неоднородный характер теплового воздействия, присущий реальным пожарам. В статье, для анализа параметров железобетонной конструкций во времени реального пожара, использован программный комплекс Abaqus, который позволяет реализовать численное моделирование в термомеханической постановке задачи. Приведено описание численной модели железобетонной плиты перекрытия на основе принятой физической модели существующего каркаса, включая задание геометрических параметров, теплофизических и физико-механических свойств бетона и арматуры, а также условий теплового нагружения. Основная цель исследования заключается в проверке корректности заданных исходных данных в численной модели и в обосновании возможности дальнейших исследований на её основе. Валидация численного моделирования выполнена путём сопоставления результатов аналитического и численного методов расчёта теплотехнической задачи, при этом установленная в ходе сравнения допустимая сходимость подтверждает корректность принятой численной модели и обосновывает возможность её дальнейшего применения для анализа теплового воздействия реального пожара на железобетонные конструкции и оценки их огнестойкости.

*Ключевые слова:* Abaqus, перемещающийся пожар, численный метод

V.S. FEDOROV<sup>1</sup>, P.A. MATVIENKO<sup>1</sup><sup>1</sup>Russian University of Transport, Moscow, Russia

## NUMERICAL STUDY OF THE HEAT-TRANSFER PROBLEM SOLUTION FOR A REINFORCED CONCRETE FLOOR SLAB WITHIN A FIRE COMPARTMENT USING ABAQUS

*Abstract.* Under current conditions, the fire resistance assessment of building structures cannot be limited to the use of the standard time-temperature fire curve, since it does not reflect the transient and spatially non-uniform thermal exposure inherent to real fires. This paper describes the use of the Abaqus software package to analyze the behavior of reinforced concrete structures under real-fire conditions, enabling numerical simulation within a coupled thermo-mechanical framework. A numerical model of a reinforced concrete floor slab is presented on the basis of the adopted physical model of an existing structural frame, including the definition of geometric parameters, the thermophysical and mechanical properties of concrete and reinforcement, and the thermal loading conditions. The main objective of the study is to verify the correctness of the input data specified in the numerical model and to substantiate the feasibility of further investigations based on it. Model validation is carried out by comparing the results obtained from analytical and numerical solutions of the heat-transfer problem; the acceptable agreement achieved in this comparison confirms the correctness of the adopted numerical model and supports its further application for analyzing the thermal effects of real fires on reinforced concrete structures and assessing their fire resistance.

*Keywords:* Abaqus, travelling fire, numerical method

## 1. Введение

В задачах огнестойкости использование одной лишь стандартной температурно-временной кривой (без учета реального режима роста температуры, отсутствия фазы охлаждения, неизменных условий работы материала) способно исказить расчётную картину предельных состояний несущих систем [1, 2]. Реальный пожар в пожарном отсеке носит нестационарный и пространственно неоднородный характер [3]: режим горения переходит от роста к полному развитию и далее к затуханию. Одним из определяющих факторов теплового воздействия является перемещающийся пожар [4-6]. Явление перемещающегося пожара можно охарактеризовать как форму теплового воздействия, при которой тепловой поток изменяется по координате конструкции и во времени, последовательно переходя и прогревая различные её участки. Игнорирование этого фактора способно привести как к избыточной, так и к недостаточной оценке времени до потери несущей способности. Стандартный нагрев зачастую переоценивает длительность высоких температур без учёта охлаждения, но недооценивает локальные экстремумы теплового потока и градиентов, определяющих прогрев арматуры и потерю устойчивости [1, 5].

В современных условиях при исследованиях поведения строительных конструкций при воздействии реального пожара применение исключительно аналитических методов является недостаточным, поскольку такие методы на упрощённых предположениях, одномерных или квазистационарных схемах теплопереноса и не позволяют в полной мере учитывать пространственное распределение температур, нелинейные свойства материалов и их деградацию при нагреве, а также сложный характер взаимодействия между элементами конструктивной системы [3, 7]. В этой связи приоритетное значение приобретает численный анализ строительных конструкций при воздействии реального пожара. В настоящее время при расчёте строительных конструкций всё более широкое применение находят автоматизированные программные комплексы, основанные на методе конечных элементов (Finite Element Method, FEM) [8, 9]. Указанный метод относится к численным методам решения дифференциальных уравнений в частных производных и интегральных уравнений, которые возникают при решении задач прикладной механики, теплофизики и строительной физики. Применение конечно-элементного анализа позволяет разбить расчётную область на совокупность конечных элементов и на этой основе получать решения задач с учётом сложной геометрии, нелинейных свойств материалов и разнообразных граничных условий.

Использование FEM в автоматизированных программных системах обеспечивает возможность решения широкого круга инженерных задач, к числу которых относятся исследования процессов теплопереноса, распределения температурных полей и температурных градиентов в элементах строительных конструкций. Одним из наиболее универсальных и распространённых программных комплексов, в которых реализован FEM, является Abaqus [9, 10], позволяющий выполнять связанный термомеханический анализ строительных конструкций и получать детализированную картину их напряжённо-деформированного состояния при воздействии высокотемпературных нагрузок.

Для проведения численных экспериментов в программном комплексе Abaqus по решению теплотехнической задачи при пространственно неоднородном тепловом воздействии необходимо выявить требуемые корректные исходные данные, определяющих геометрию расчётной области, физико-механические и теплофизические свойства материалов, нагрузочные воздействия и граничные условия. В настоящей работе, на основании принятых исходных данных, приведено описание принятой численной модели в среде Abaqus, а также выполнена проверка корректности получаемых результатов на основе сопоставления с аналитическим решением теплотехнической задачи. Такое сопоставление позволяет оценить адекватность принятой расчётной схемы и достоверность численного моделирования температурного поля в исследуемой конструкции.

## 2. Модели и методы

### Описание принятой физической модели для анализа

В качестве исходной физической модели принята железобетонная плита перекрытия многоэтажного офисного здания, опертая на железобетонные колонны. Рассматриваемый пожарный отсек характеризуется пролётами размером 6×6 м как один из рядовых случаев при проектировании общественных зданий каркасного типа. Толщина плиты перекрытия составляет 200 мм. Колонны приняты сечением 400х400 мм. В качестве основного материала конструкции принят бетон класса В30, а в качестве рабочей растянутой арматуры — сталь класса А500С. Нагрузка, действующая на плиту перекрытия, принимается равной сумме нагрузки от собственного веса плиты и полезной нагрузки = 3 кН/м<sup>2</sup>. Тепловое воздействие принято равным 753 МДж/м<sup>2</sup>. При анализе методов будет рассматриваться сечение по центру конструкции, как самое деформируемое.

### Численная модель

Применяемая численная модель в программной среде Abaqus, предназначена для исследования термомеханического отклика железобетонной плиты при воздействии пожарной нагрузки. Для обеспечения корректного воспроизведения температурных и деформационных процессов применён связанный анализ типа coupled temp–displacement, позволяющий совместно учитывать теплоперенос и изменение напряжённо-деформированного состояния конструкции [9-11].

Исходная геометрия плиты и арматурного каркаса была сформирована в системе CATIA V5 и импортирована в пространство Abaqus (см. рисунки 1, 2). Анализ нагрева по высоте КЭ возможен благодаря внутренним интеграционным точкам, в которых вычисляются температурно-зависимые параметры состояния. На каждом шаге нестационарного анализа по заданной зависимости «время–температура» последовательно решается связанная термopрочностная задача при установленных граничных условиях теплообмена и закрепления. При этом напряжённо-деформированное состояние определяется с учётом текущего температурного поля, деградации свойств материалов и исходной геометрии конструкции, что обеспечивает корректное воспроизведение пространственной и временной эволюции поведения элемента при нагреве.

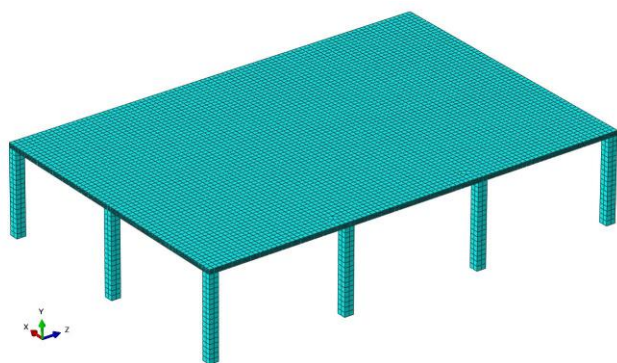


Рисунок 1 - Разбиение модели на объемные конечные элементы

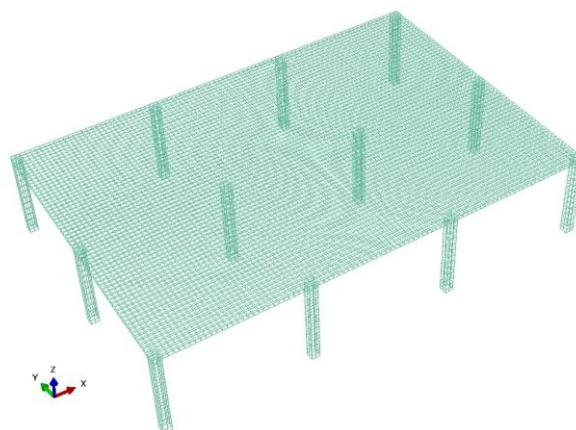


Рисунок 2 - Разбиение модели на стержневые конечные элементы

Модель механического состояния бетона под нагрузкой принята по предложенной О.В. Радайкиным криволинейной диаграмме «напряжение–деформация» [2, 12, 13]. В качестве критерия вводится безразмерная величина (формула 1):

$$D = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_2}\right)^2 \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – текущая деформация;  $\varepsilon_2$  – предельная деформация бетона (отдельно для растяжения и сжатия).

Напряжения при растяжении  $\sigma_{bt}(\varepsilon_{bt})$  и сжатии  $\sigma_b(\varepsilon_b)$  задаются аналитическими выражениями вида:

$$\sigma_{bt} = \alpha_t^{(t)} E \varepsilon_{bt} - b_t^{(t)} D_{bt} E; \quad \sigma_b = \alpha_c^{(c)} E \varepsilon_b - b_c^{(c)} D_b E \quad (2)$$

в которых коэффициенты  $\alpha_t, b_t, c_t$  и  $\alpha_c, b_c, c_c$  рассчитываются через расчетные сопротивления бетона  $R_{bt}, R_b$ , деформации в вершине диаграммы  $\varepsilon_{bt0}, \varepsilon_{b0}$  и определенные деформации  $\varepsilon_{bt2}, \varepsilon_{b2}$ . Для практики автор предлагает определять эти параметрические точки по нормам СП 63.13330, после чего по полученным формулам строятся согласованные диаграммы (см. рис. 3) при растяжении и сжатии для бетонов различных классов прочности. Таким образом, модель сочетает нормативно совместимую параметризацию с явным учетом накопления повреждений через деформационный критерий  $D$  [12]. Указанные параметры рассматриваются как функции температуры и аппроксимируются по нормативным кривым поведения с использованием интерполяции, после чего для каждого температурного уровня формируются диаграммы «напряжение–деформация» для бетона и стали, используемые при последующем численном моделировании.

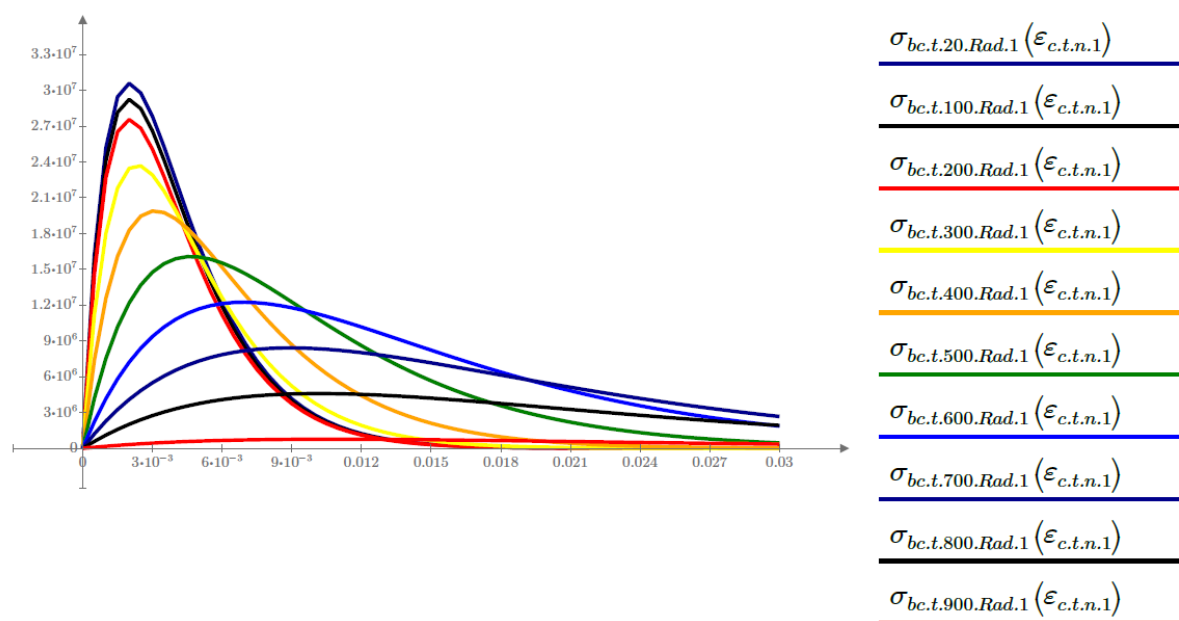
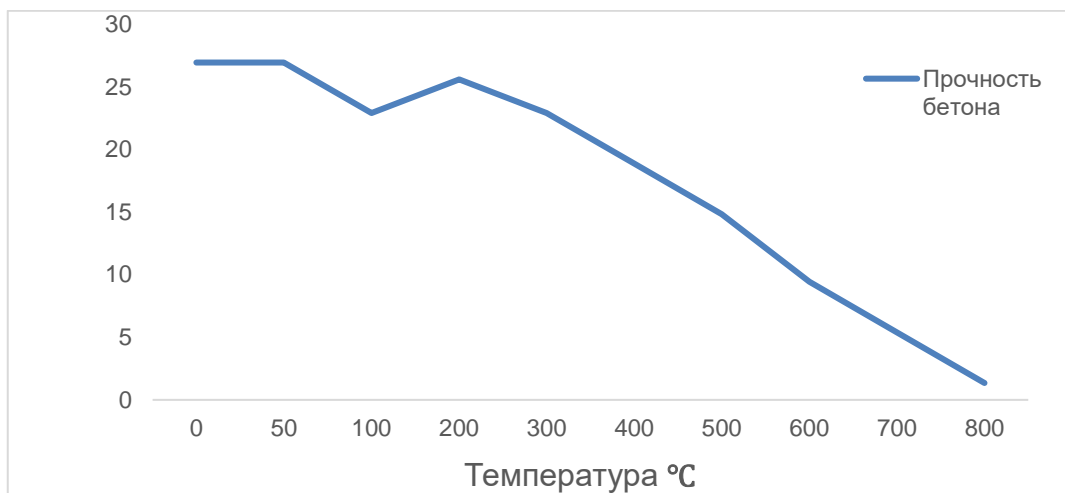


Рисунок 3 - Диаграмма деформирования бетона по О.В. Радайкину при температуре 20÷900 °С

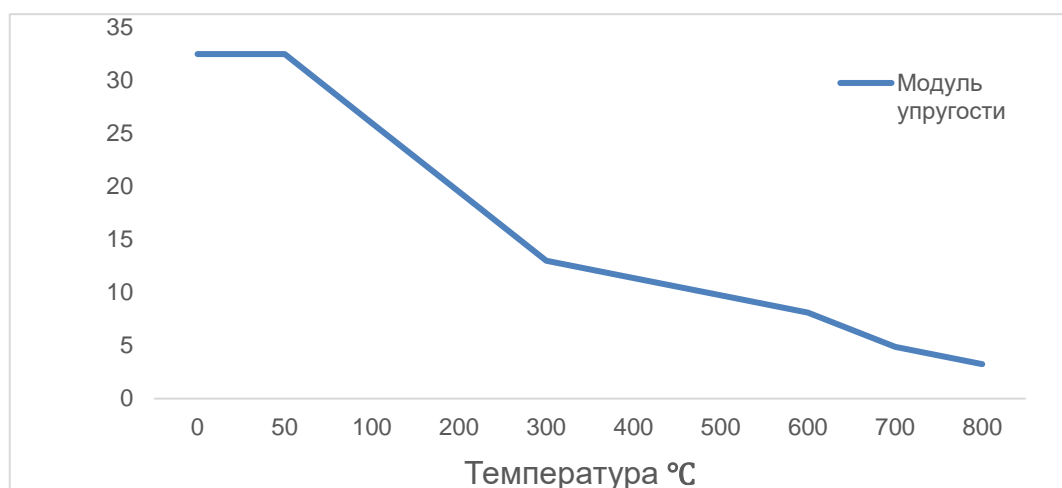
Физико-механические характеристики бетона и арматуры задавались упругими и пластичными свойствами, описанными ниже. Прочность бетона в условиях температурного воздействия принимается в виде (формула 3):

$$R_{b.f} = R_b \cdot \gamma_{b.f} \quad (3)$$

где  $\gamma_{b.f}$  – коэффициент условия работы бетона при температурных воздействиях.



*Рисунок 4 - Прочность бетона в зависимости от температуры*  
Модуль упругости:



*Рисунок 5 - Модуль упругости бетона в зависимости от температуры*

### 3. Результаты исследования и их анализ

#### Аналитическое решение

В качестве основы для аналитического расчета была принята методология, разработанная В. М. Ройтманом [14-16]. Теоретическую основу применённого подхода составляет его докторская диссертация «Оценка огнестойкости строительных конструкций на основе кинетических представлений о поведении материалов в условиях пожара» [14], в которой сформулированы фундаментальные положения кинетической теории огнестойкости и изложен метод определения предельного состояния конструкций через эволюцию их термически изменяющихся свойств. Прикладные аспекты методологии Ройтмана использованы в соответствии с положениями монографии «Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий» [15], где приведены физические основы огнестойкости, принципы инженерной интерпретации пределов огнестойкости и расчетные схемы для стандартных и реальных пожарных режимов.

Температурная кривая пожара установлена исходя из пожарной нагрузки, проёмности и теплоаккумулирующей способности ограждающих конструкций.

Для аналитического расчета принято, что помещение имеет источник дополнительной вентиляции в виде двух окон размерами 3x2(h) м в вертикальных ограждающих конструкциях. Приведённая проёмность помещения составила  $K1 = 0.0911 \text{ м}^{1/2}$ .

Приведённая пожарная нагрузка — 640.05 МДж/м<sup>2</sup>.

Коэффициент режима пожара —  $\psi = 1.213$ .

Определено время достижения максимальной температуры среды при пожаре в помещении  $\tau_{max} = 53.032$  мин (0.884 ч.).

Тепловой источник на стадии развития пожара  $\theta_{\psi} = 1534.253$  °С.

Стадия затухания принята линейной убывающей функцией со скоростью:

11.6 °С/мин.

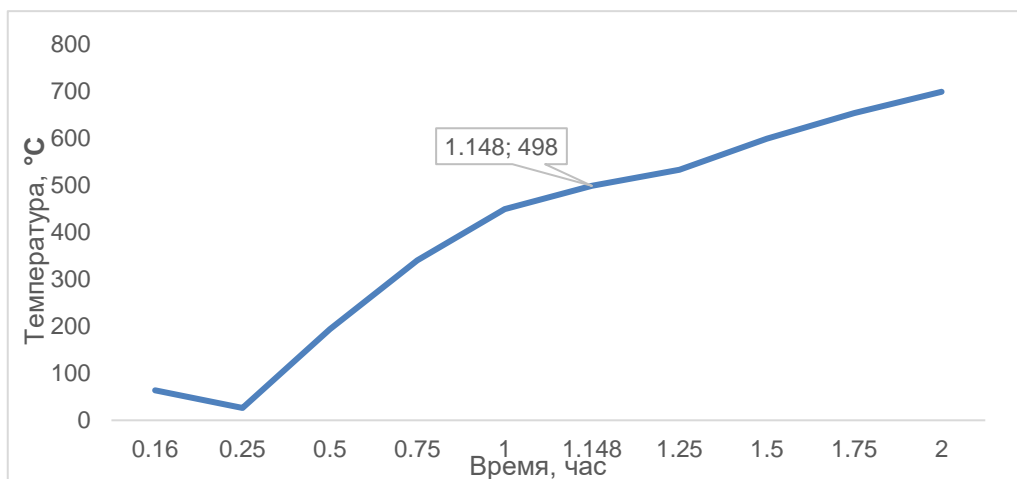
Для моделирования прогрева плиты использован коэффициент температуропроводности бетона  $\alpha_{tpr} = 0.001294 \frac{m^2}{ch}$ .

Прогрев защитного слоя определяется через относительное расстояние между зоной растянутой арматуры и толщиной прогретой части плиты.

Критическая температура арматуры по условиям потери несущей способности  $t_{s.cr} = 498$  °С.

Таблица 1 - Фактические температуры растянутой арматуры в интервале времени 0.16–2.0 ч

Время пожара (ч)	Температура арматуры (°С)
0.16	63.6
0.25	26.2
0.50	193.3
0.75	340.1
1.00	448.8
1.148	498
1.25	532.1
1.50	598.3
1.75	652.5
2.00	698.0



*Рисунок 6 - Температура рабочей растянутой арматуры плиты в стадии развития пожара в помещении*

Максимальная рассчитанная температура арматуры: 698 °С. Критическая температура достигается за 1,148 ч.

**Численное решение**

В процессе расчёта, выполняемого в программном комплексе Abaqus, реализуется последовательное и взаимосвязанное решение тепловой и механической подсистемы, основанное на методах нелинейного конечно-элементного анализа. На первом этапе вычислительный алгоритм формирует температурное поле, определяемое решением нестационарного уравнения теплопроводности с учётом теплоёмкости, теплопроводности и

условий теплообмена на границах конструкции. Температура в каждом конечном элементе обновляется по мере продвижения расчёта во времени, что позволяет моделировать развитие термического воздействия пожара и пространственный характер прогрева железобетонного сечения. На рис. 7 показаны значения температуры в узлах конечных элементов арматуры на начальной стадии нагрева и после температурного воздействия в течение 1.5 ч.

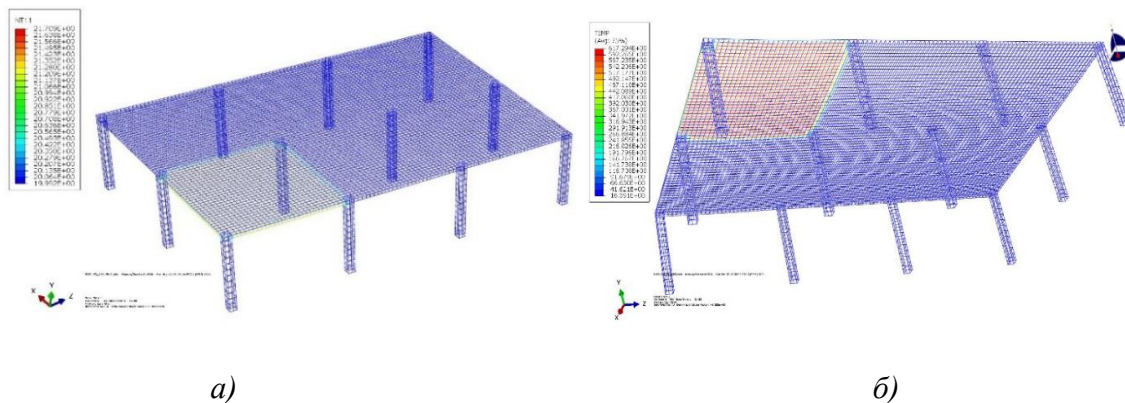


Рисунок 7 - Температура в узлах КЭ арматурной сетки: а) Начальная заданная температура, б) температура после 1.5 часов воздействия

Таблица 2 - Фактические температуры растянутой арматуры в интервале времени 0.16–1.5 ч

Время пожара (ч)	Температура арматуры (°C)
0,16	21,4
0,17	35,84
0,18	55,54
0,2	72,6
0,25	92,67
0,27	115,62
0,29	141,29
0,3	169,65
0,38	184,8
0,41	200,7
0,43	234,7
0,5	272
0,56	313
1,09	498
1,5	501

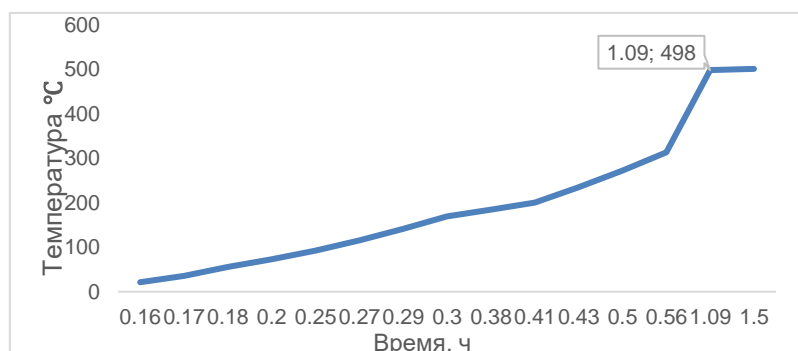


Рисунок 8 - Эволюция температуры в рабочей растянутой арматуре со временем

Критическая температура рабочей растянутой арматуры достигается через 1.09 ч.

#### 4. Заключение

1. Сопоставление результатов аналитического и численного методов расчёта показало удовлетворительное согласование параметров термического отклика арматуры в условиях пожарного воздействия.
2. Согласно аналитической методике, основанной на температурно-временных зависимостях нагрева железобетонного сечения, достижение критической температуры рабочей растянутой арматуры происходит на моменте 1.149 ч.
3. Численный расчёт, выполненный в программном комплексе Abaqus с учётом реального теплопереноса и температурно-зависимых свойств материалов, показал достижение того же критического состояния через 1.09 ч.
4. Различие между двумя значениями составляет порядка 5 %, что соответствует высокому уровню сходимости для инженерных расчётов, включающих нелинейные температурные и механические эффекты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров, В. С. Актуальные проблемы оценки огнестойкости конструкций в составе несущей системы здания / В. С. Федоров // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования : материалы Национальной научно-практической конференции, Астрахань, 09 февраля 2018 года. – Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 3-7.
2. Радайкин, О. В. Совершенствование методики расчёта жёсткости изгибаемых элементов из обычного железобетона с применением теорий силового сопротивления : специальность 05.23.01 "Строительные конструкции, здания и сооружения" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Радайкин Олег Валерьевич. – Казань, 2012. – 183 с.
3. Hesien, Mohamed & Youssef, Maged & El-Fitiany, Salah. (2025). Finite Element Analysis of Flat Plate Structures in Fire. *Fire*. 8. 252. 10.3390/fire8070252.
4. Сугрова, В. Е. Перемещающиеся пожары: методология и влияние на конструктивные характеристики / В. Е. Сугрова, П. А. Матвиенко // Потенциал интеллектуально одарённой молодежи - развитию науки и образования : материалы VIII Международного научного форума молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников, Астрахань, 23–25 апреля 2019 года. Том 2. – Астрахань: Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 55-64.
5. Матвиенко, П. А. Перемещающийся пожар: моделирование динамики температуры / П. А. Матвиенко // Безопасность строительного фонда России проблемы и решения : материалы Международных академических чтений, Курск, 14 ноября 2025 года. – Курск: Курский государственный университет, 2025. – С. 62-68.
6. Stern-Gottfried, Jamie & Rein, Guillermo. (2012). Travelling fires for structural design–Part I: Literature review. *Fire Safety Journal*. 54. 74–85. 10.1016/j.firesaf.2012.06.003.
7. Gao, Wan-Yang & Dai, Jian-Guo & Teng, J.G. & Chen, Guangming. (2013). Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire. *Engineering Structures*. 52. 488–501. 10.1016/j.engstruct.2013.03.017.
8. Zheng, Yong-Qian & Zhuang, Jin. (2011). Analysis on Fire Resistance of Reinforced Concrete Wall. *Advanced Materials Research*. 243-249. 797-800. 10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.797.
9. Hua, Nan & Elhami Khorasani, Negar & Tessari, Anthony. (2022). Numerical modeling of the fire behavior of reinforced concrete tunnel slabs during heating and cooling. *Engineering Structures*. 258. 114135. 10.1016/j.engstruct.2022.114135.
10. Elshorbagi, Mohamed & AlHamaydeh, Mohammad. (2023). Simulation of RC Beams during Fire Events Using a Nonlinear Numerical Fully Coupled Thermal-Stress Analysis. *Fire*. 6. 57. 10.3390/fire6020057.
11. Stern-Gottfried, Jamie & Rein, Guillermo & Bisby, Luke & Torero, Jose. (2010). Experimental review of the homogeneous temperature assumption in post-flashover compartment fires. *Fire Safety Journal*. 45. 249-261. 10.1016/j.firesaf.2010.03.007.
12. Радайкин, О. В. Сравнительный анализ различных диаграмм деформирования бетона по критерию энергозатрат на деформирование и разрушение / О. В. Радайкин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2019. – № 10. – С. 29-39.
13. Радайкин, О. В. Теоретические основы диаграммного метода расчёта стержневых элементов из армированного бетона / О. В. Радайкин // Строительство и реконструкция. – 2020. – № 6(92). – С. 26-42.
14. Ройтман, В.М. Оценка огнестойкости строительных конструкций на основе кинетических представлений о поведении материалов в условиях пожара : диссертация ... доктора технических наук : 05.26.01. - Москва, 1985. - 412 с.

15. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В.М. Ройтман – Москва : Изд-во Ассоц. «Пожарная безопасность и наука», 2001 г.
16. Ройтман В. М., Приступок Д. Н. Особенности оценки стойкости зданий и сооружений из железобетонных конструкций при комбинированных особых воздействиях с участием пожара // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. Том 19. №7.

## REFERENCES

1. Fedorov V.S. Aktualnye problemy otsenki ognestoykosti konstruksiy v sostave nesushchey sistemy zdaniya [Current issues in assessing the fire resistance of structures within a building's load-bearing system]. *Innovatsionnoe razvitie regionov: potentsial nauki i sovremennogo obrazovaniya : materialy Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Astrakhan, 09 fevralya 2018 goda. Astrakhan: Astrakhanskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet; 2018:3-7. (rus)
2. Radaykin O.V. *Sovershenstvovanie metodiki rascheta zhestkosti izgibaemykh elementov iz obychnogo zhelezobetona s primeneniem teorii silovogo soprotivleniya* [Improvement of the method for calculating the stiffness of bent elements made of ordinary reinforced concrete using theories of force resistance] [dissertation]. Kazan; 2012. 183 p. (rus)
3. Hesien M., Youssef M., El-Fitianny S. Finite Element Analysis of Flat Plate Structures in Fire. *Fire*. 2025;8(7):252. doi:10.3390/fire8070252.
4. Sugrova V.E., Matvienko P.A. Peremeshchayushchiesya pozhary: metodologiya i vliyanie na konstruktivnye kharakteristiki [Travelling fires: methodology and impact on structural characteristics]. *Potentsial intellektualno odaryonnoy molodezhi - razvitiyu nauki i obrazovaniya : materialy VIII Mezhdunarodnogo nauchnogo foruma molodykh uchenykh, innovatorov, studentov i shkolnikov*. Astrakhan, 23-25 aprelya 2019 goda. Tom 2. Astrakhan: Astrakhanskiy gosudarstvennyy arkhitekturno-stroitelnyy universitet; 2019:55-64. (rus)
5. Matvienko P.A. Peremeshchayushchiesya pozhar: modelirovanie dinamiki temperatury [Travelling fire: modeling temperature dynamics]. *Bezopasnost stroitel'nogo fonda Rossii: problemy i resheniya : materialy mezhdunarodnykh akademicheskikh chteniy*. Kursk, 14 noyabrya 2025 goda. Kursk: Kurskiy gosudarstvennyy universitet; 2025:62-68. (rus)
6. Stern-Gottfried J., Rein G. Travelling fires for structural design–Part I: Literature review. *Fire Safety Journal*. 2012;54:74-85. doi:10.1016/j.firesaf.2012.06.003.
7. Gao W.-Y., Dai J.-G., Teng J.G., Chen G.M. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire. *Engineering Structures*. 2013;52:488-501. doi:10.1016/j.engstruct.2013.03.017.
8. Zheng Y.-Q., Zhuang J. Analysis on Fire Resistance of Reinforced Concrete Wall. *Advanced Materials Research*. 2011;243-249:797-800. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.797.
9. Hua N., Elhami Khorasani N., Tessari A. Numerical modeling of the fire behavior of reinforced concrete tunnel slabs during heating and cooling. *Engineering Structures*. 2022;258:114135. doi:10.1016/j.engstruct.2022.114135.
10. Elshorbagi M., AlHamaydeh M. Simulation of RC Beams during Fire Events Using a Nonlinear Numerical Fully Coupled Thermal-Stress Analysis. *Fire*. 2023;6(2):57. doi:10.3390/fire6020057.
11. Stern-Gottfried J., Rein G., Bisby L., Torero J. Experimental review of the homogeneous temperature assumption in post-flashover compartment fires. *Fire Safety Journal*. 2010;45:249-261. doi:10.1016/j.firesaf.2010.03.007.
12. Radaykin O.V. Sravnitelnyy analiz razlichnykh diagramm deformirovaniya betona po kriteriyu energozatrat na deformirovanie i razrushenie [Comparative analysis of various concrete deformation diagrams based on the criterion of energy consumption for deformation and fracture]. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova*. 2019;10:29-39. (rus)
13. Radaykin O.V. Teoreticheskie osnovy diagrammnogo metoda rascheta sterzhnevyykh elementov iz armirovannogo betona [Theoretical foundations of the diagram method for calculating reinforced concrete bar elements]. *Stroitelstvo i rekonstruktsiya*. 2020;6(92):26-42. (rus)
14. Roytman V.M. *Otsenka ognestoykosti stroitelnykh konstruksiy na osnove kineticheskikh predstavleniy o povedenii materialov v usloviyakh pozhara* [Assessment of fire resistance of building structures based on kinetic concepts of material behavior under fire conditions] [dissertation]. Moscow; 1985. 412 p. (rus)
15. Roytman V.M. *Inzhenernye resheniya po otsenke ognestoykosti projektiruemyykh i rekonstruiruemyykh zdaniy* [Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings]. Moscow: Izd-vo Assots. "Pozharnaya bezopasnost i nauka"; 2001. (rus)
16. Roytman V.M., Pristupyuk D.N. Osobennosti otsenki stoykosti zdaniy i sooruzheniy iz zhelezobetonnnykh konstruksiy pri kombinirovannykh osobykh vozdeystviyakh s uchastiem pozhara [Features of assessing the resistance of buildings and structures made of reinforced concrete structures under combined special impacts involving fire]. *Pozharovzryvobezopasnost*. 2010;19(7). (rus)

**Информация об авторах**

**Фёдоров Виктор Сергеевич**

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,  
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения»,  
E-mail: [fvs\\_skzs@mail.ru](mailto:fvs_skzs@mail.ru)

**Матвиенко Павел Алексеевич**

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия,  
аспирант кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»,  
E-mail: [ms.ol@mail.ru](mailto:ms.ol@mail.ru)

**Information about author**

**Fedorov Viktor S.**

Russian University of Transport, Moscow, Russia,  
doctor in tech. sc., prof., head of the dep. of civil and industrial engineering  
E-mail: [fvs\\_skzs@mail.ru](mailto:fvs_skzs@mail.ru)

**Matvienko Pavel A.**

Russian University of Transport, Moscow, Russia,  
PhD student, dep. of civil and industrial engineering  
E-mail: [ms.ol@mail.ru](mailto:ms.ol@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 15.01.2026  
Одобрена после рецензирования 09.02.2026  
Принята к публикации 12.02.2026

The article was submitted 15.01.2026  
Approved after reviewing 09.02.2026  
Accepted for publication 12.02.2026

А.А. ФЕДОРОВСКАЯ<sup>1</sup>, Н.П. УМНЯКОВА<sup>2</sup>, Ю.А.СКАСЫРСКАЯ<sup>1</sup>, С.Г. ШЕЙНА<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия  
<sup>2</sup>ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия

## МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БАЛАНСА МЕЖДУ МИТИГАЦИЕЙ И АДАПТАЦИЕЙ К ИЗМЕНЕНИЯМ КЛИМАТА ПРИ КОМПЛЕКСНОМ РАЗВИТИИ ТЕРРИТОРИИ

***Аннотация.** Территориальное планирование и градостроительное проектирование – это комплекс мер по обеспечению устойчивого развития городов и мегаполисов сегодня. Вопросы, связанные с адаптацией к климатическим изменениям в условиях глобального потепления в генеральных планах городов, отображаются однобоко, в виде результатов анализа природно-климатических условий тех или иных территорий. Адаптационные и митигационные мероприятия, находят отражение в планах адаптации городов или паспортах климатической безопасности. Комплексное развитие территорий – это высокоэффективный инструмент формирования комфортной среды жизнедеятельности. Цель исследования – разработка методики, обеспечивающей баланс между адаптацией и митигацией при комплексном развитии территорий. В качестве объекта исследования выбрана территория города Ростова-на-Дону. Методический инструментарий, подобранный для поставленной цели – это адаптированная методика комплексной оценки земель, которая взаимоувязывает разнохарактерную информацию о состоянии городских территорий. Обоснована необходимость подбора мероприятий для снижения негативного влияния проявления климатических изменений. Поэтапная реализация методики продемонстрирована на примере проекта здания общеобразовательного учреждения, размещенного на территории комплексного развития в городе Ростове-на-Дону.*

***Ключевые слова:** климат, адаптация городов, климат города, КРТ, комплексная оценка территории, энергоресурсосбережение, умное здание, митигация, климатическая адаптация*

A.A. FEDOROVSKAYA<sup>1</sup>, N.P. UMNYAKOVA<sup>2</sup>, YU.A. SKASYRSKAYA<sup>1</sup>, S.G. SHEINA<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia  
<sup>2</sup> Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia

## METHODOLOGY FOR ENSURING A BALANCE BETWEEN MITIGATION AND ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE IN THE INTEGRATED DEVELOPMENT OF THE TERRITORY

***Abstract.** Territorial planning and urban design are a set of measures to ensure the sustainable development of cities and megacities today. Issues related to adaptation to climate change in the context of global warming are reflected in city master plans in a one-sided manner, based on analyses of the natural and climatic conditions of specific areas. Adaptation and mitigation measures are reflected in city adaptation plans or climate safety passports. Integrated development of territories is a highly effective tool for creating a comfortable living environment. The purpose of the study is to develop a methodology that ensures a balance between adaptation and mitigation in the integrated development of territories. The territory of the city of Rostov-on-Don was chosen as the object of the study. The methodological toolkit selected for this purpose is an adapted methodology for integrated land assessment, which interconnects diverse information about the state of urban territories. The need to select measures to reduce the negative impact of climate change is substantiated. The step-by-step implementation of the methodology is demonstrated on the example of a project for a general education institution building located on the territory of integrated development in the city of Rostov-on-Don.*

***Keywords:** climate, urban adaptation, city climate, KRT, integrated territory assessment, energy conservation, smart building, mitigation, climate adaptation*

## 1. Введение

Основными предпосылками необходимости климатической адаптации и митигации городов являются не только сложности в управлении, связанные с учетом всех особенностей их развития, но и рост подверженности и уязвимости территорий при наступлении опасных либо экстремальных погодных явлений. Зачастую при осуществлении градостроительной политики глобальные климатические изменения не учитываются, либо носят локальный (рекомендательный) характер [1]. Учет природно-климатических условий и опасных метеорологических явлений производится при осуществлении территориального планирования и градостроительного проектирования урбанизированных территорий в нормативном документе СП 42.13330.2011 [2] согласно Приказу [3]. Согласно Градостроительному кодексу [4] расчет минимальных показателей обеспечения комфортной среды жизнедеятельности человека и включение их в региональные нормы проектирования осуществляется соответственно климатическим характеристикам каждого конкретного субъекта Российской Федерации. Речь идет о существующих климатических характеристиках, учитываемых при проектировании [2,4]:

- планировочной структуры городов;
- радиусов обслуживания объектов социальной инфраструктуры;
- объектов озеленения общественных пространств и прочее.

Адаптация к изменениям климата и оценка последствий этих изменений в условиях урбанизированных территорий учитываются при разработке паспортов климатической безопасности, либо стратегических планов климатической адаптации на региональном уровне. В этих стратегических документах учитываются особенности городской среды, а также проблемы, связанные с климатическими изменениями. В настоящее время можно выделить следующие успешные планы климатической адаптации для городов по степени своей проработанности:

1. Проект распоряжения Правительства Москвы «Об утверждении перечня мероприятий по адаптации города Москвы к климатическим изменениям» [5].
2. Региональный план адаптации Санкт-Петербурга к изменениям климата с мониторингом реализации мероприятий и ежегодной реализацией [6].

Однако, не все регионы Российской Федерации и города обеспечены методическим инструментарием сопровождения, оценки и учета климатических рисков в рамках территориального планирования и градостроительного проектирования. Под особенностями развития городов понимается такое сочетание компонентов городской среды:

- многокомпонентная пространственная структура – жилые здания, социальная инфраструктура, транспортная инфраструктура, инженерная инфраструктура и т.д. [7];
- специфическая городская среда – зеленый каркас, водный каркас, природный ландшафт и особенности рельефа, историко-культурная среда (памятники истории и культуры), архитектурные формы и т.д. [8-10].
- геоэкологическое состояние территории – загрязнение воздуха, воды и почв, шумовое загрязнение, инженерно-геологические условия территории, зоны подтопления [11].

Данные компоненты городов существуют взаимосвязано, а именно архитектурные объекты (искусственные объекты), городское население и гео- и биосфера Земли. Исходя из вышесказанного можно было бы применить к городской территории и ее оценке такой подход как «поликритериальность», так как параметров, характеризующих ее множество. Однако, этого может быть недостаточно, соответственно, система должна быть многоуровневой «город-район(микрорайон)-квартал-здание(объект)». Городская территория и ее процессы рассматриваются с разных точек зрения учеными из разных областей: экономистами, проектировщиками, девелоперами и архитекторами, что еще больше подчеркивает ее многоаспектность [12,13].

Все компоненты городской среды влияют на качество жизни человека и комфортность его жизнедеятельности. Нельзя игнорировать глобальные изменения климата, и адаптацию к ним, которая во многих странах уже стала частью социально-экономической политики и нацелена на снижение экологических рисков и угроз [14-16].

Для городских территорий и мегаполисов адаптационные и митигационные меры должны отображаться в региональных и отраслевых планах адаптации [17-19] в таблице 1 перечислены основные документы, утвержденные на законодательном уровне.

Таблица 1 - Систематизация мероприятий для адаптации и митигации в условиях изменений климата

Нормативный документ	Год	Уровень управления/отрасль	Меры, отображаемые в документе в области строительства и градостроительства
План адаптации к изменениям климата отрасли - здравоохранения	2021	Федеральный, Отраслевой/ здравоохранение	1. Энергоресурсосбережение зданий и помещений, модернизация сетей и автономное энергоснабжение. 2. Реконструкция, ремонт и реставрация зданий с применением технологий, устойчивых к атмосферным воздействиям; 3. Внедрение современных систем вентиляции и кондиционирования в медицинские здания и учреждения [17].
План адаптации к изменениям климата в области транспорта	2022	Федеральный Отраслевой/ транспорт	1. Совершенствование нормативов строительства, проектирования и эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры с учетом изменения климата; 2. Мониторинг объектов транспортной инфраструктуры, находящихся в зонах, подверженных, уязвимых к климатическим изменениям и рискам; 3. Внедрение и апробация инновационных строительных материалов (и добавок к ним) при ремонте и дальнейшей эксплуатации дорог [18] и прочие.
План адаптации к изменениям климата в сферах строительства, теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения Российской Федерации	2021	Федеральный Отраслевой/ строительство	1. Разработка методов обследования объектов инженерной инфраструктуры по проведению ремонта и восстановления; 2. Систематизация и анализ информации о количестве отказов и аварий на объектах теплоснабжения и водоснабжения [19].

В последние пять лет управление и обеспечение комфортной городской среды осуществляется через комплексное развитие территорий (далее – КРТ) [20]. Сам механизм КРТ берет свое начало после утверждения Федерального закона от 30.12. 2020 № 494-ФЗ и позволяет осуществлять реконструкцию городской застройки вне зависимости от формы собственности (для частной и муниципальной). КРТ представляет собой комплекс мероприятий по строительству, частичной или полной реконструкции жилого фонда (сноса

ветхого или аварийного жилья), а также благоустройства. Минстрой России совместно с ДОМ.РФ и КБ «Стрелка» разработали методологическую основу оценки территории для развития КРТ в виде стандартов для:

- развития застроенных территорий [21],
- освоения свободных территорий [22].

А также для выбора перспективных территорий предлагается «Руководство по реализации проектов» [23], определяющие критерии выбора места для КРТ.

Цель исследования – разработка методического инструментария выбора места для КРТ с учетом адаптации и митигации к изменениям климата.

В качестве объекта исследования рассматривается территория города Ростова-на-Дону.

Предметом исследования является совокупность характеристик территории города Ростова-на-Дону, представляемая в виде системы оценочных критериев для уровня оценки «Город».

Стоит отметить, что баланс между адаптацией и митигацией в условиях изменения климата требует тщательного анализа существующей ситуации на территории Российской Федерации. Митигация (от англ. mitigation – смягчение) – стратегическое направление развития энергетической, градостроительной и региональной политики, направленное на значительное снижение выбросов парниковых газов [24]. В условиях КРТ – это применение энергоресурсосберегающих технологий [25]. А адаптация — это мероприятия, направленные на приспособление территории к неблагоприятным последствиям изменения климата. В рамках рассматриваемой проблемы – это инженерно-геологические, экологические и инфраструктурные риски и проблемы городской среды [26].

Для определения места климатических изменений и адаптации к ним в разделе «Материалы и методы» будет произведен подробный анализ этих Стандартов Минстроя для КРТ, а также представлен предлагаемый авторами методический инструментарий к оценке территории города.

## 2. Модели и методы

Современные методологические подходы к оценке многоуровневых систем таких как город выделяют следующие:

1. Системный подход.
2. Комплексный подход.
3. Интуитивный подход
4. Технико-экономический подход.

Для высокоурбанизированных территорий наиболее применяемыми учеными являются комплексный и системный подходы [7,8,11,12], при этом в качестве единиц измерения результатов могут быть как финансовые показатели социально-экономических эффектов территории, так и балльные оценки, имеющие лингвистическое описание уровней этих оценок. В рамках представленного исследования предлагается системный подход к оценке города. Уровень оценки – город. Методика, адаптируемая под задачу исследования – комплексная оценка территории.

Многокритериальная комплексная оценка земель берет свое начало в трудах С.И. Кабаковой [27] и эволюционируют в трудах А.П. Ромма, М.А. Сибриковой и других авторов [28-31], а также совершенствовалась у других ученых, использующих математические модели при оценке природно-ландшафтных и экологических характеристик территории [24,25]. В роли эффективного инструментария реализации комплексной оценки территории выбираются геоинформационные системы, предназначенные не только для систематизации всех факторов, но и для осуществления последующего моделирования [30-35].

В первую очередь стоит проанализировать критерии из Стандартов КРТ [21-23].

В обобщенном виде перечислены следующие критерии при КРТ (таблица 2 и 3).

**Таблица 2 - Система критериев из Стандартов Минстроя КРТ для застроенных территорий**

Критерии для развития застроенных территорий	
Критерий	Описание или ед. измерения
Тип застройки	Историческая, уникальная, общественно-деловая и прочие
Доля помещений объектов общественно-деловой инфраструктуры от общей площади застройки территории	%
Плотность застройки территории	м <sup>2</sup> /га
Плотность населения	чел./га
Плотность улично-дорожной сети	км/км <sup>2</sup>
Ширина улиц	м
Площадь квартала (максимальная)	м <sup>2</sup>
Площадь застройки квартала	м <sup>2</sup>
Этажность	Малоэтажная Среднеэтажная Индивидуальная

**Таблица 3 - Система критериев предпроектного анализа из Стандартов Минстроя КРТ для свободных земель**

Критерии для освоения свободных земель	
Определение точек притяжения	
Критерий (доступность/близость)	Описание или ед. измерения
Транспортная инфраструктура	Аэропорты, ТПУ, вокзалы и т.д.
Объекты административно-делового и производственного назначения	Общественно-деловой центр; администрация города, технопарки и НИИ и т.д.
Объекты культуры, досуга и отдыха	Театры, музеи, выставочные залы; концертные залы, объекты спорта и т.д.
Объекты образования	Детские сады, школы, ВУЗы и т.д.
Объекты здравоохранения	Клиники, больницы, поликлиники, реабилитационные и диагностические центры и т.д.
Объекты торговли и услуг	Торговые центры, магазины, аптеки и т.д.
Исследования и характеристики территории	
Градостроительные исследования	Схема ПЗЗ, схема ЗОИУТ, схема размещения инженерной инфраструктуры и т.п. [22]
Геология и геодезия	Топография, рельеф, поверхностные и грунтовые воды, грунт и т.д.
Гидрометеорология и экология	карта ветра; температурная карта; влажность, осадки, инсоляция
Историко-культурная ценность	Объекты культурного наследия и особо охраняемые территории
Социологические исследования	Анализ потребности граждан (соцопрос)
Экономические исследования	Социально-экономический прогноз, анализ рынка недвижимости, административные ограничения и т.д. [22]

Проанализировав Стандарты КРТ [21,22], можно отметить, что информация, собираемая на предпроектном этапе разнохарактерная, и, объективно, не учитывается информация о климатических изменениях и проблемах, которые могут быть вызваны в связи с этими изменениями.

Анализ зарубежного опыта в освоении территорий в условиях плотной городской застройки авторов [36-38] демонстрирует важность таких параметров как: состояние

городских территорий, водные объекты и их состояние, риск катастроф и опасных природных явлений и состояние окружающей среды. Данные параметры вносятся в единую систему, которая получила название «Модель комплексной максимальной нагрузки на город (UCCC – Urban Comprehensive Carrying Capacity)» [38].

Для обеспечения сбалансированного развития территории при разработке проекта и выбора места КРТ разработана методика обеспечения баланса между митигацией и адаптацией к изменениям климата (рисунок 1).

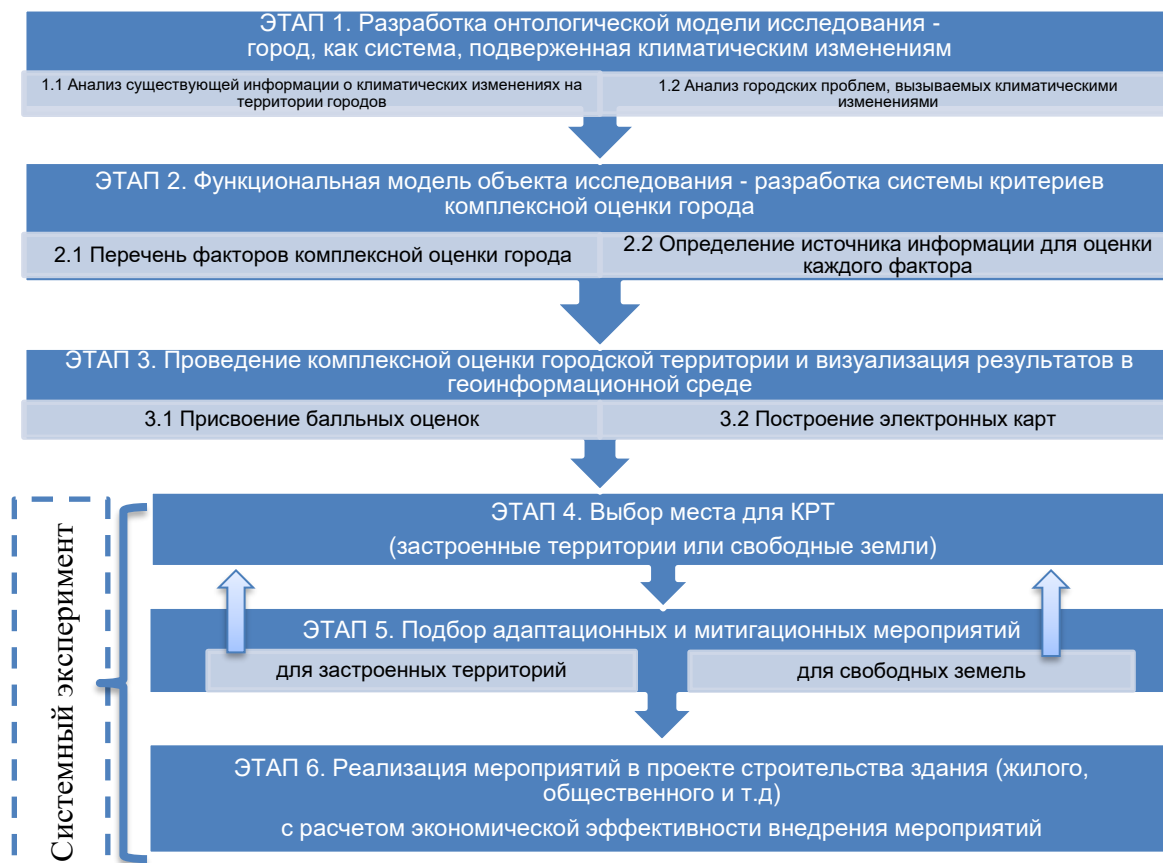


Рисунок 1 – Методика обеспечения баланса между митигацией и адаптацией к изменениям климата при комплексном развитии территории

Суть разработки методики заключается в следующих ее особенностях:

1. пошаговая систематизация информации о климатических изменениях, экологическом состоянии и инфраструктурном потенциале застройки для КРТ.
2. интеграция разнохарактерных параметров (из разных областей и источников данных), показателей состояния территории города в единую систему – адаптированной методике комплексной оценки территории, визуализированной в геоинформационной среде (далее – ГИС).
3. интерпретация результатов и принятие решения о выборе местоположения КРТ с учетом митигации и адаптации к климатическим изменениям (в среде ГИС).

Методологическая база исследования, позволяющая адаптировать методику комплексной оценки территории, основана на работах авторов [26,28,31,36]. Адаптированная комплексная оценка, как методический инструмент, обеспечивает систематизацию пространственных данных для анализа городской территории, и ее основных характеристик. Основные подсистемы факторов комплексной оценки территории это:

- социально-экономическая подсистема;
- экологическая подсистема;

— климатические риски и митигация.

Территория города разбивается на оценочные участки (согласно кадастровому делению) либо по микрорайонам (согласно риэлторскому делению) и производится массовая оценка этих характеристик путем сравнения относительно друг друга. Каждый оценочный фактор оценивается в баллах в пределах шкалы от 0 до 1. Для осуществления КРТ предложена следующая система факторов комплексной оценки, представленная в таблице 4.

Таблица 4 - Критерии относительной ценности при КРТ

№ п/п	Подсистема	Критерии относительной ценности	Обозначение	Балл
1	Социально-экономическая	Доступность центра города	К1	0...1
2		Уровень инженерного обустройства (коммуникации, транспорт)	К2	0...1
3		Уровень развития сферы культурно-бытового обслуживания населения	К3	0...1
4	Экологическая	Состояние окружающей среды	К4	0...1
5		Инженерно-геологические условия, влияющие на строительство	К5	0...1
6		Озеленение территории [39]	К6	0...1
7	Климатические риски и митигация	Оценка усредненной температурной аномалии на территории (городской остров тепла) [40]	К7	0...1
8		Пылевое загрязнение	К8	0...1
9		Предприятия и количество выбрасываемых ими загрязнений	К9	0...1

Результатом комплексной оценки территории города является серии электронных карт по девяти факторам, позволяющие массово производить пространственный анализ и осуществлять выбор мест (свободных для освоения) для размещения КРТ, либо развивать существующую застройку в рамках таких проектов. Пошаговая реализация и описание комплексной оценки территории представлена в следующем разделе на примере города Ростова-на-Дону.

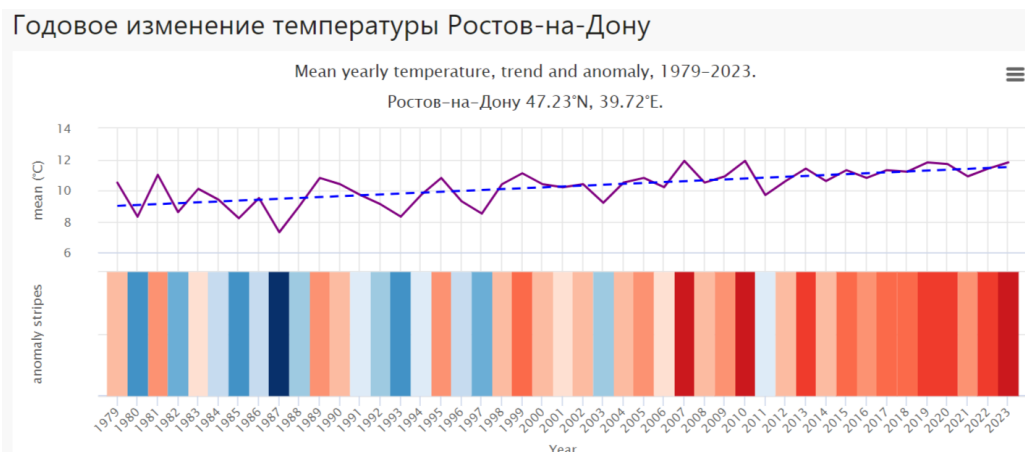
### 3. Результаты исследования и их анализ

Первый этап - разработка онтологической модели исследования - город, как система, подверженная климатическим изменениям. Необходимо в рамках этапа произвести оценку климатических изменений рисков и угроз. Уровень оценки – город.

Согласно докладу Росгидромета [41] и рейтингу регионов по необходимости адаптации, составленному авторами исследования [42] для Ростовской области ключевыми рисками являются:

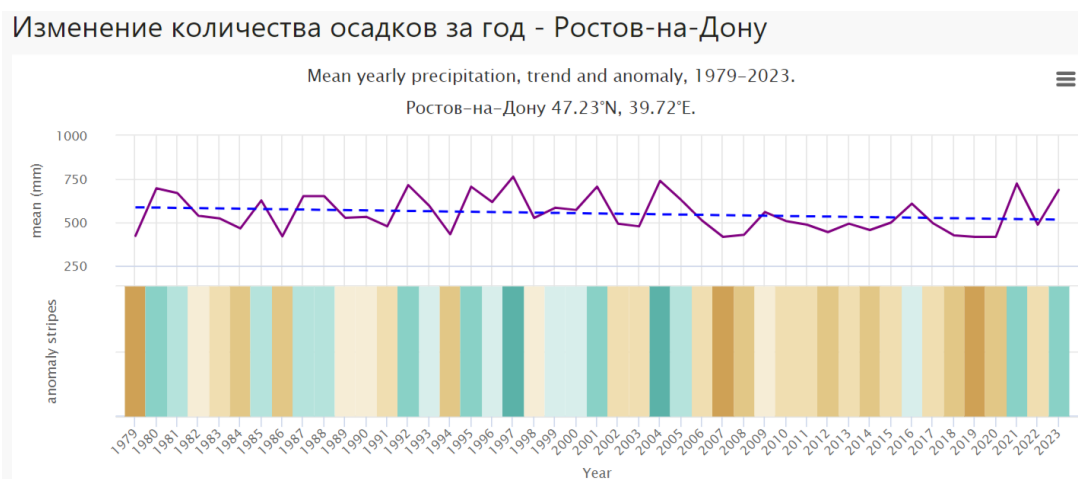
- волны жары;
- засуха;
- водный стресс (нехватка воды в особенности в засушливый период).

Годовой график изменения температуры города Ростова-на-Дону, представлен на рисунке 2, согласно которому видна тенденция увеличения температуры за последние пятнадцать лет.



**Рисунок 2 – График годового изменения температуры (заимствован из источника – Портал Meteoblue - <https://www.meteoblue.com>)**

Верхний график в виде синей пунктирной линии – это тенденция роста температур в условиях климатических изменений за последние годы. Красные полосы в нижней части графика – это более «теплые» годы. На приведённом графике (рисунок 3) показано среднегодовое количество осадков в регионе Ростов-на-Дону. Согласно графику, заметно значительное снижение количества осадков, коричневые линии внизу графика характеризуют засушливые периоды в эти годы.



**Рисунок 3 –График годового изменения количества осадков (заимствован из источника – Портал Meteoblue -<https://www.meteoblue.com>)**

На территории города с помощью данных дистанционного зондирования земли авторами исследования [43] выявлены зоны «тепловых аномалий», то есть аномалий теплового поля города, на которых наблюдается тенденция увеличения температуры в теплое время года. Базируясь на данных этого исследования, можно внедрить этот фактор в методику комплексной оценки территории.

Второй этап - Функциональная модель объекта исследования - разработка системы критериев комплексной оценки города. Уровень оценки – город.

Комплексная оценка производится по девяти факторам, каждый из которых оценивается в пределах от 0 до 1. Территория города Ростова-на-Дону развивается на оценочные участки. В данном исследовании за оценочные участки принимается «риэлторское» деление территории по районам. В данном случае деления районы представляются не так укрупненно, как административные, но при этом достаточно

информативно отображают информацию о состоянии участков-микрорайонов. По каждому фактору путем линейной интерполяции производится сравнительный анализ каждого участка относительно друг друга. Расширенная информация о процессе оценки представлена в таблице 5.

Третий этап - проведение комплексной оценки городской территории и визуализация результатов в геоинформационной среде. Уровень оценки – город.

Пример карты комплексной оценки территории Ростова-на-Дону по фактору «Предприятия и количество выбрасываемых ими загрязнений» представлен на рисунке 4, а расшифровка районов отображена в таблице 6.

**Таблица 5 - Процесс оценки городской территории при КРТ**

<b>Критерии относительной ценности</b>	<b>Значение</b>	<b>Балл</b>	<b>Описание</b>	<b>Обоснование оценки</b>	<b>Источник данных</b>
Доступность центра города	ядро общегородского центра	1	Зона центра города (административный центр города)	Пространственный анализ территории в связи с принятыми радиусами доступности. Доступность исторического центра и культурной жизни города.	Данные из Yandex, OpenStreetmap (далее - OSM), интегрированные в QGIS
	800-метров от административного центра-ядра города	0,5	10-ти минутная пешая доступность		
	1600-метров от административного центра-ядра города	0,25	20-ти минутная пешая доступность		
Уровень инженерного обустройства (коммуникации, транспорт)  <b>Сумма по 6 показателям</b>	0-3	0,25	Удовлетворительно	1.обеспеченность водоснабжением (0 – отсутствует 1 - есть) 2.обеспеченность канализацией (0 – отсутствует 1 - есть) 3.обеспеченность электроснабжением (0 – отсутствует 1 - есть) 4.наличие транспортно-пересадочных узлов (0 – отсутствует 1 - есть) 5.разновидность доступного транспорта (0 – отсутствует 1 - есть) 6.состояние и развитость пешеходных дорожек и тротуаров (0 – отсутствует 1 - есть)	Данные из генерального плана города, OSM, интегрированные в QGIS
	3-6	0,5	Хорошо		
	6	1	Наиболее благоприятно		
Уровень развития сферы культурно-бытового обслуживания населения	0%	0	Плохо	Показатель определяется радиусами обслуживания населения данными объектами и предприятиями обслуживания жилой застройки по СП 42.13330.2016.	Данные из Яндекс-карт, интегрированные в QGIS
	25%	0,25	Удовлетворительно		
	50%	0,5	Хорошо		

Продолжение Таблицы 5

	75%	0,75	Благоприятно		
	100%	1	Наиболее благоприятно		
Состояние окружающей среды (Индекс загрязнения воздуха - ИЗА)	> 13	0	очень высокое загрязнение	Оценка участков проводится с использованием индекса загрязнения атмосферы (ИЗА).	Карта загрязнения воздуха по В.В. Приваленко. [44]
	от 8 до 13	0,5	высокое загрязнение		
	от 5 до 8	0,75	повышенное загрязнение		
	менее 5	1	низкое загрязнение		
Инженерно-геологические условия, влияющие на строительство (категории геологического риска)	Неопасная	0	Неопасная	На каждом оценочном участке составлен процент зоны риска территории на 1 м <sup>2</sup> полигона на основе пространственного анализа города	Карты геологического риска [45]
	Малоопасная	0,33	Малоопасная		
	Опасная	0,66	Опасная		
	Чрезвычайно опасная	1	Чрезвычайно опасная		
Озеленение территории (Процент озеленения площади полигона)	0%	0	Плохо	На каждом оценочном участке составлен процент озеленяемой площади территории на 1 м <sup>2</sup> полигона на основе пространственного анализа города	Данные из OSM интегрированные в QGIS
	25%	0,25	Удовлетворительно		
	50%	0,5	Хорошо		
	75%	0,75	Благоприятно		
	100%	1	Наиболее благоприятно		
Оценка усредненной температурной аномалии на территории (городской остров тепла, процент от площади полигона)	0%	0	Неопасный уровень	На каждом оценочном участке составлен процент площади территории с аномалией тепла на 1 м <sup>2</sup> полигона на основе пространственного анализа города	Исследование по данным ДЗЗ [43]
	25%	0,25	Умеренно опасный уровень		
	50%	0,5	Опасный уровень		
	75%	0,75	Весьма опасный уровень		
	100%	1	Чрезвычайно опасный уровень		
Пылевое загрязнение	0%	0	Неопасный уровень	Данные собраны согласно с полями максимальных приземных концентраций от суммации выбросов азота диоксида и азота оксида, мазутной золы, серы диоксида и прочих примесей от основных энергоисточников г. Ростова-на-Дону	Экологический вестник Дона [46]
	25%	0,25	Умеренно опасный уровень		
	50%	0,5	Опасный уровень		
	75%	0,75	Весьма опасный уровень		
	100%	1	Чрезвычайно опасный уровень		
Предприятия и количество выбрасываемых ими загрязнений	0%	0	Неопасный уровень	Данные собраны согласно с полями максимальных приземных концентраций от суммации выбросов азота диоксида и азота оксида, мазутной золы, серы диоксида и прочих примесей от основных энергоисточников г. Ростова-на-Дону	Экологический вестник Дона [46]
	25%	0,25	Умеренно опасный уровень		
	50%	0,5	Опасный уровень		
	75%	0,75	Весьма опасный уровень		
	100%	1	Чрезвычайно опасный уровень		

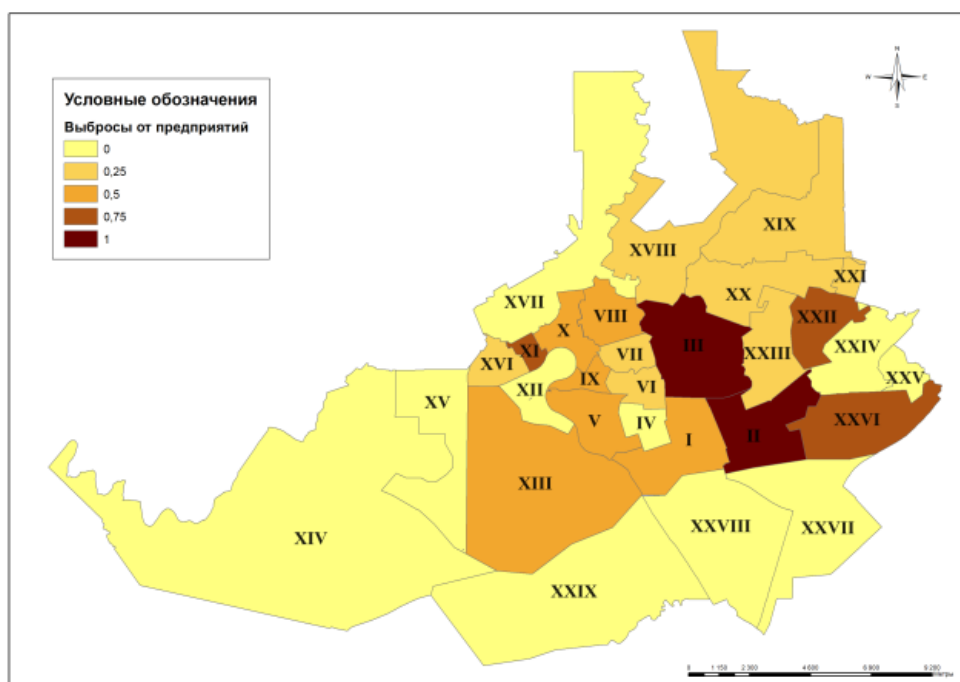


Рисунок 4 – Предприятия и количество выбрасываемых ими загрязнений

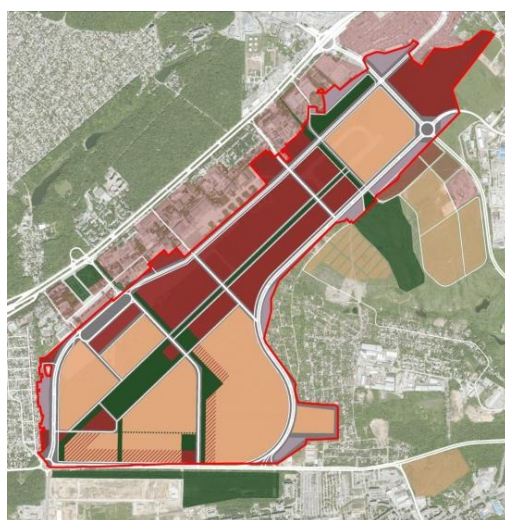
Таблица 6 - Условные обозначения карты комплексной оценки города

Номер оценочного участка	Название
I	Центр
II	Нахичевань
III	Ворошиловский
IV	Комсомольская площадь
V	Новое поселение
VI	Нансена
VII	Каменка
VIII	Вавилова
IX	Зоопарк
X	Военвед
XI	Болгарстрой
XII	Змеевская балка
XIII	Железнодорожный район
XIV	Советский
XV	ЗЖМ
XVI	Стройгородок
XVII	Суворовский
XVIII	Северный (СЖМ)
XIX	Ростовское море
XX	Чкаловский
XXI	Туполева
XXII	2 поселок Орджоникидзе
XXIII	Сельмаш
XXIV	Аэропорт
XXV	Кирпичный завод
XXVI	Александровка
XXVII	Зеленый остров
XXVIII	Левобережный
XXIX	2-ая Луговая

Четвертый, пятый и шестой этапы объединены в Блок – системный эксперимент, в котором осуществляется выбор КРТ и подбор адаптационных и митигационных мероприятий для этого места.

Четвертый этап - выбор места для КРТ (застроенные территории или свободные земли). Уровень оценки – город.

В результате анализа местом КРТ выбрана территория старого аэропорта на проспекте Шолохова (участок XXIV) [47]. Схема функционального зонирования территории, подлежащей комплексному развитию отображена на рисунке 5.



Условные обозначения:

	– граница комплексного развития территории;
	– жилая зона;
	– зона смешанной и общественно-деловой застройки*;
	– общественно-деловая зона;
	– зона инженерной и транспортной инфраструктуры;
	– зона транспортной инфраструктуры (зона улично-дорожной сети);
	– зона озелененных территорий общего пользования.
* Предполагается размещение многоквартирных жилых домов с объектами обслуживания жилой застройки во встроенных, пристроенных и встроенно-пристроенных помещениях и отдельно стоящих объектах общественно-делового назначения.	

Рисунок 5 – Функциональное зонирование выбранной территории

Пятый этап - подбор адаптационных и митигационных мероприятий для свободных земель. Уровень оценки – микрорайон, квартал.

Обобщая опыт региональных планов адаптации все мероприятия можно разделить на две группы, которые можно использовать как митигационные:

- 1) Мероприятия для территории города;
- 2) Мероприятия для здания.

Таблица 7 - Мероприятия для митигации и адаптации в условиях изменения климата

План адаптации регионов	Мероприятия для территории города	Мероприятия для здания
Вологодская область Белгородская область Волгоградская область Кемеровская область	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Перевод котельных на природный газ;</li> <li>2) Оптимизация деятельности по разделному сбору и утилизации ТКО (твердых коммунальных отходов).</li> <li>3) Оптимизация выбора технологии работы со скользкостью;</li> <li>4) Развитие городского электротранспорта;</li> <li>5) Разработка системы инжиниринга зеленой инфраструктуры городских урбобиоценозов</li> <li>6) Реализация программы энергосбережения и энергоэффективности;</li> <li>7) Пересмотр нормативов по теплоспротивлению и отоплению</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Реконструкция и полная замена котельного оборудования в государственных учреждениях;</li> <li>2) Внедрение энергосберегающих мероприятий в учреждениях</li> <li>3) Теплоизоляция ограждающих конструкций учреждений</li> <li>4) Терморегуляторы, термоэкраны и другие термоотражающие материалы в государственных учреждениях.</li> <li>5) Применение технологий диспетчеризации «Умное здание» [48].</li> </ol>

В случае, если мероприятия заведомо применять нецелесообразно с экономической или технической точки зрения, предлагается вернуться на предыдущий этап и выбрать территорию для осуществления КРТ заново.

Шестой этап - реализация мероприятий в проекте строительства здания с расчетом экономической эффективности внедрения мероприятий. Уровень оценки – здание. Рассмотрим возможности внедрения технологий «Умное здание» при разработке проекта общеобразовательного учреждения на территории старого аэропорта в городе Ростове-на-Дону.

Концепцией «климатический нейтральных зданий» предполагается применение энергоэффективных технологий, экологичных материалов и выходящих на «нулевой энергобаланс» [47,48]. Предлагается ввести в проект строительства общеобразовательного учреждения систему диспетчеризации, которая обеспечивает централизованный мониторинг и управление всеми инженерными системами при эксплуатации здания [49].

Здание школы на 600 мест пятиэтажное – 4 надземных и 1 подвальный этаж, двухсекционное Н-образной и Г-образной формы. Размеры в осях проектируемого здания представлены в таблице 8. Здание общеобразовательного учреждения - каркасно-монолитное с несущими наружными трёхслойными стенами из газобетонных блоков, минераловатного утеплителя, облицованных кирпичом. Высота первого и второго этажей составляет 3,9 м, третьего – 4,02 м, а подвального этажа – 2,7 м.

**Таблица 8 - Размеры здания общеобразовательного учреждения**

Наименование блока	Форма	Оси	Размер (м)
Блок А	Н-образная	1-30 / А-Т/1	74,8 x 77,0 м.
Блок Б	Г-образная	1-28 / Т-Я	35,0 x 64,5 м.

Для заданного здания рассчитано внедрение системы диспетчеризации СДК «Кристалл» [50]. В укрупненном виде расчет стоимости установки системы диспетчеризации СДК «Кристалл» в ценах 2025 года выглядит следующим образом (таблица 9).

**Таблица 9 - Расчет стоимости установки системы диспетчеризации**

Обозначения	Характеристика	Цена с НДС, руб.
СДК-330S1 (TCP/IP)	Пульт диспетчера на базе ПЭВМ	105000
СДК-33	Блоки сопряжения пульта с блоками контроля по двухпроводной линии	324870
СДК-31	Блоки контроля S. Связь с пультом диспетчера через блок сопряжения по двухпроводной линии. Длина линии связи до 5000 м.	601524
СДК-31	Блоки контроля S1. Связь с пультом диспетчера через локальную сеть или интернет.	772812
JSB 62.0	Кнопка вызова со шнурком	3600
СДК-037K1, СДК-037K1.2, СДК-037K1.M	Комплект зоны безопасности МГН (адаптер, оповещатель, переговорное устройство с кнопкой отключения оповещателя)	26070
Команда монтажников ООО «Кристалл»	Монтаж оборудования, пусконаладочных работ, обучения персонала	3000000
	<b>Итого</b>	<b>4833876</b>

Затем были произведены расчеты экономической эффективности внедряемой инновационной технологии для эксплуатационной фазы здания, результаты продемонстрированы в таблице 10.

Таблица 10 - Экономическая эффективность установки системы диспетчеризации

Показатель	Единица измерения	Значение
Чистый дисконтированный доход	руб.	216 120,14
Индекс доходности	-	1, 01
Внутренняя норма доходности	%	30
Срок окупаемости	год	8

Исходя из приведенного расчета, можно сделать вывод, что внедрение системы являются недостаточно экономически эффективными, однако, эффективность их предполагается в основном на эксплуатационной фазе здания. Внедряемые системы управления с датчиками движения контролируют:

- состояние и работу инженерного оборудования;
- диспетчерскую связь;
- параметры инженерных систем.

#### **4. Заключение**

1. Разработка методики обеспечения баланса между митигацией и адаптацией к изменениям климата при комплексном развитии территории обусловлена отсутствием в генеральных планах городов и стандартах оценки территории на предпроектной стадии климатических рисков и изменений.

2. Формирование комфортной среды жизнедеятельности в условиях снижения климатических рисков и угроз возможно при комплексном подходе к выбору территории для КРТ с учетом мероприятий, обеспечивающих экологическую безопасность и баланс энерго-ресурсо-потребления.

3. Адаптация методики комплексной оценки территории путем введения критериев, отвечающих за климатические изменения, способствуют принятию эффективных градостроительных решений.

4. Разработанная методика позволяет учитывать не только особенности территорий, но и осуществлять подбор и внедрение адаптационных и митигационных мероприятий.

#### **5. Благодарности**

Работа выполнена в рамках ФНИ 3.1.4.1 «Разработка научных основ энергетической концепции формирования городской среды обитания человека при ее реконструкции» НИИСФ РААСН. Работа подготовлена в рамках субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гашо Е.Г., Булгаков Н.С., Шкуро Ю.Д. Оценка энергетических эффектов модернизации зданий и микрорайонов в процессе реновации // Энергетические системы. 2019. № 1. С. 196-199.
2. СП 42.13330.2011 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-8
3. Приказ Минрегиона России от 26.05.2011 № 244 «Об утверждении Методических рекомендаций по разработке проектов генеральных планов поселений и городских округов».
4. Градостроительный кодекс РФ.
5. План мероприятий по адаптации города Москвы к климатическим изменениям. Официальный городской портал г. Москва. URL: <https://www.mos.ru/eco/documents/prochie/view/310121220/>
6. Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности. Официальный сайт. Администрация Санкт-Петербурга. URL: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ecology/adaptaciya-k-izmeneniyam-klimata/>

7. Власов Д.Н., Данилина Н.В. Концепции устойчивого развития территорий // Архитектура и строительство России. 2023. № 2(246). С. 8-9.
8. Зайкова Е.Ю. Гибридные модели в структуре природно-инженерного каркаса города // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26 № 4 С. 44–61. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-4-44-61.
9. Щербина Е.В., Салмо А. Градостроительные риски утраты культурного наследия // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12, № 4. С. 46-63.
10. Хрулев Д.А., Красильникова Э.Э., Данилова С.Б. Ландшафтный урбанизм: анализ исследований интеграции терапевтических садов в городскую среду // Системные технологии. 2024. № 2(51). С. 134-145.
11. Ермолаева С.В., Кочуров Б.И. Природно-ландшафтная дифференциация и природная устойчивость экосистем региона // Экология урбанизированных территорий. 2024. № 1. С. 23-30.
12. Енин А.Е. Шевелев В.П., Ступак Е.Ю. Ретроспективный системный эксперимент при архитектурно-градостроительных исследованиях экологических систем "население↔среда" (на примере Г. Воронеж) // Строительство и реконструкция. – 2018. – № 4(78). – С. 64-75.
13. Енин А.Е. Понятие эксперимента в архитектуре как деятельности, направленной на гармонизацию взаимосвязи и взаимовлияния населения и среды его жизнедеятельности // Градостроительство. 2012. № 4. С. 22-29
14. Порфирьев Б.Н., Данилов-Данильян В.И. Изменения климата и экономика России: тенденции, сценарии, прогнозы. Москва: Научный консультант, 2022. 514 с.
15. Adger W.N., Huq S., Brown K., Conway D., Hulme M. Adaptation to climate change in the developing world // Prog Dev Stud. 2003. Vol. 3. No. 3. Pp. 179-195. URL: <https://doi.org/10.1191/1464993403ps0600a>
16. Порфирьев Б.Н., Терентьев Н.Е., Зинченко Ю.В. Планирование адаптации к изменениям климата: мировой опыт и возможности для устойчивого социально-экономического развития России // Проблемы прогнозирования. 2023. № 2 (197). С. 154-168.
17. План адаптации к изменениям климата отрасли здравоохранения. Сайт министерства здравоохранения Российской Федерации. URL: <https://minzdrav.gov.ru/documents/9701-plan-adaptatsii-k-izmeneniyam-klimata>
18. Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 2 марта 2022 г. № 69 «Об утверждении Плана адаптации к изменениям климата в области транспорта». Сайт министерства транспорта Российской Федерации. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/11749?type=2>
19. План адаптации к изменениям климата в сферах строительства, теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения Российской Федерации. Сайт Минстроя России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/131732/>
20. Руднева Т.А. Применение инструментов комплексного развития территории и мастер-планирования при реализации мегапроектов // Architecture and Modern Information Technologies. 2024. №4(69). С. 279-291.
21. Стандарт развития застроенных территорий. Сайт Минстроя России. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/18284/>
22. Стандарт освоения свободных территорий. Сайт Минстроя России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/18285/>
23. Руководство по реализации проектов. Сайт Минстроя России. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/18288/>
24. Dovbly N.S. Resource-climatic innovations' as a concept of the era of energy transition and formation of "green" economy // Management in Modern Systems. 2024. №2. С. 29-42.
25. Льюй Ю., Фомин Н.И., Сьюй В., Ли Ц. Меры по снижению углеродных выбросов на этапе эксплуатации зданий // Перспективы науки. 2025. № 3(186). С. 72-76.
26. Данилина Н.В., Солнцева Л.Н. Геомоделирование последствий подтопления урбанизированных территорий в ходе изменения климата на примере Республики Карелия // Вестник евразийской науки. 2025. Т. 17, № 1.
27. Кабакова С.И. Градостроительная оценка территории городов. Москва: Стройиздат, 1971. 153 с.
28. Сибрикова, М.А. Закономерности движения транспортных потоков в г. Челябинске // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2008. № 12(112). С. 8-12.
29. Ромм А.П. Математико-модельные основы комплексной оценки и функционального зонирования городских территорий // Вопросы оценки. 1997. №4. С. 2–11.
30. Жарников В.Б., Ван А.В., Николаева О.Н. Учет экологических функций литосферы при оценке территорий // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2012. № 2-1. С. 151-153.
31. Задворнева Е.П. Совершенствование методики комплексной оценки пространственного развития Астанинской агломерации // Инновационная экономика. 2021. № 4(29). С. 69-79.
32. Ермакова Ю.И., Кочуров Б.И. Природно-ландшафтные, исторические и градостроительные факторы развития Хабаровска // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17, № 3(64). С. 153-162.

33. Яблоков В.М. Геоинформационный анализ структуры и динамики природно- экологического каркаса Москвы на основе открытых геоданных // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. №1(1) С.42-48.
34. Серее Т.Э., Братков В.В., Тесфай Т. Анализ землепользования и температуры поверхности земли по спутниковым изображениям города Мендефера // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2024. Т. 29. № 5. С. 69-79.
35. Кривогуз Д.О., Захарова Ю.Б. Применение геопространственного анализа при прогнозировании эколого-экономического развития керченского полуострова // Геоинформатика. 2018. № 1. С. 52-55.
36. Metaxas T. Mega projects and sustainable city image: evidence from Nuevo Norte Project of Madrid // International Journal of Urban Sustainable Development. 2024. №16(1). С. 108-128. URL: <https://doi.org/10.1080/19463138.2024.2327318>
37. Zhao L., Jiaying L., Qinglong S. Evaluation of urban comprehensive carrying capacity: case study of the Beijing – Tianjin–Hebei urban agglomeration, China // Springer Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature. 2020. С. 19774-19782.
38. Li B., Guan M., Zhan L., Liu C., Zhang Z., Jiang H., Zhang Y., Dong G. Urban comprehensive carrying capacity and development order: "A pressure -capacity - potential" logical framework // Frontiers in Environmental Science. 2022. № 10. DOI: 10.3389/fenvs.2022.935498
39. Зайкова Е.Ю. Гибридные модели первой группы и зеленая инфраструктура: приемы устойчивой интеграции // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2024. № 2(46). С. 26-41.
40. Гиясов А.И. Значение городского острова тепла в регулировании микро- и эоклимата // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2023. Т. 23, № 1. С. 5–15.
41. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Под ред. В.М. Катцова. Санкт-Петербург, 2017. 106 с.
42. Макаров И.А., Чернокульский А.В. Влияние изменения климата на экономику России: рейтинг регионов по необходимости адаптации // Журнал Новой экономической ассоциации. 2023. № 4 (61). С. 145–202.
43. Складенко Г.Ю., Шехурдин Г.Р. Особенности теплового поля города Ростова-на-Дону по данным дистанционного зондирования Земли // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки. 2024. № 1. С. 97–104.
44. Приваленко В.В., Безуглова О.С. Экологические проблемы антропогенных ландшафтов Ростовской области. Том I. Экология города. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2003. 290 с.
45. Меркулова К.А. Инженерно-геологические условия г. Ростова-на-Дону. Ростов-на-Дону: РГПУ, 2006. 132 с.
46. Экологический вестник Дона. О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2023 г. / под ред. М.В. Фишкина. Ростов н/Д.: Изд-во Министерства природных ресурсов и экологии Ростовской области, 2024. 369 с.
47. Шеина С.Г., Федоровская А.А., Ларин Н.С. Технологии «умных зданий» для адаптации к изменениям климата // Жилищное строительство. 2025. № 6. С. 25–30.
48. Трибельская Е.Г., Турсунбаева Т.Ж. Современная практика проектирования низкоуглеродных городов // Системные технологии. 2021. № 38. С. 155—166.
49. Медведева Л. С., Землякова Н.С. Диагностика социально-демографической безопасности региона // Научный альманах стран Причерноморья. 2025. Т. 11, № 1. С. 13-21.
50. Диспетчеризация "Кристалл". Официальный сайт СДК «Кристалл». URL: <http://www.sdk-kristall.ru/>

## REFERENCES

1. Gasho E.G., Bulgakov N.S., Shkuro Yu.D. Assessment of the Energy Effects of Modernizing Buildings and Microdistricts during Renovation. *Energy Systems*. 2019;1:196-199.
2. \*SP 42.13330.2011 "Urban Planning. Planning and Development of Urban and Rural Settlements. Updated version of SNiP 2.07.01-89".\* (In Russ.)
3. *Order of the Ministry of Regional Development of Russia dated May 26, 2011 No. 244 "On Approval of Methodological Recommendations for the Development of Master Plans for Settlements and Urban Districts."* (In Russ.)
4. *Urban Planning Code of the Russian Federation.* (In Russ.)
5. Action Plan for Adaptation of the City of Moscow to Climate Change. Official City Portal of Moscow. URL: <https://www.mos.ru/eco/documents/prochie/view/310121220/> (In Russ.)
6. Committee on Nature Management, Environmental Protection and Ecological Safety. Official website. Administration of St. Petersburg. URL: <https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/ecology/adaptaciya-k-izmeneniyam-klimata/> (In Russ.)
7. Vlasov D.N., Danilina N.V. Concepts of Sustainable Development of Territories. *Architecture and Construction of Russia*. 2023;2(246):8-9. (In Russ.)

8. Zaykova [E.Yu.](#) Hybrid Models in the Structure of the Natural-Engineering Framework of the City. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2024;26(4):44-61. doi:10.31675/1607-1859-2024-26-4-44-61. (In Russ.)
9. Shcherbina E.V., Salmo A. Urban development risks of cultural heritage loss. *Construction: Science and Education*. 2022;12(4):46-63. (In Russ.)
10. Khrulev D.A., Krasilnikova E.E., Danilova S.B. Landscape urbanism: analysis of studies on the integration of therapeutic gardens into the urban environment. *System Technologies*. 2024;2(51):134-145. (In Russ.)
11. Ermolaeva S.V., Kochurov B.I. Natural landscape differentiation and natural sustainability of regional ecosystems. *Ecology of Urbanized Territories*. 2024;1:23-30. (In Russ.)
12. Enin A.E., Shevelev V.P., Stupak [E.Yu.](#) Retrospective systems experiment in architectural and urban planning studies of ecological systems "population ↔ environment" (on the example of the city of Voronezh). *Construction and Reconstruction*. 2018;4(78):64-75. (In Russ.)
13. Enin A.E. The concept of experiment in architecture as an activity aimed at harmonizing the relationship and mutual influence of the population and the environment of its life. *Urban Development*. 2012;4:22-29. (In Russ.)
14. Porfiriyev B.N., Danilov-Danilyan V.I. *Climate change and the economy of Russia: trends, scenarios, forecasts*. Moscow: Nauchny Konsultant; 2022. 514 p. (In Russ.)
15. Adger W.N., Huq S., Brown K., Conway D., Hulme M. Adaptation to climate change in the developing world. *Progress in Development Studies*. 2003;3(3):179-195. URL: <https://doi.org/10.1191/1464993403ps060oa>
16. Porfiriyev B.N., Terentyev N.E., Zinchenko Yu.V. Planning for adaptation to climate change: global experience and opportunities for sustainable socio-economic development of Russia. *Problemy Prognozirovaniya*. 2023;2(197):154-168. (In Russ.)
17. Plan for adaptation to climate change in the healthcare sector. Website of the Ministry of Health of the Russian Federation. URL: <https://minzdrav.gov.ru/documents/9701-plan-adaptatsii-k-izmeneniyam-klimata> (In Russ.)
18. Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of March 2, 2022 No. 69 "On Approval of the Plan for Adaptation to Climate Change in the Field of Transport." Website of the Ministry of Transport of the Russian Federation. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/11749?type=2> (In Russ.)
19. Plan for Adaptation to Climate Change in the Spheres of Construction, Heat Supply, Water Supply, and Sanitation of the Russian Federation. Website of the Ministry of Construction of the Russian Federation. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/131732/> (In Russ.)
20. Rudneva T.A. Application of Integrated Territory Development and Master Planning Tools in the Implementation of Megaprojects. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2024;4(69):279-291. (In Russ.)
21. Development Standard for Built-up Territories. Website of the Ministry of Construction of the Russian Federation. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/18284/> (In Russ.)
22. Standard for the Development of Vacant Territories. Website of the Ministry of Construction of the Russian Federation. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/18285/> (In Russ.)
23. Guidelines for Project Implementation. Website of the Ministry of Construction of the Russian Federation. URL: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/18288/> (In Russ.)
24. Dovbly N.S. Resource-climatic innovations' as a concept of the era of energy transition and formation of "green" economy. *Management in Modern Systems*. 2024;2:29-42. (In Russ.)
25. Lyu Yu., Fomin N.I., Xu W., Li Q. Measures to reduce carbon emissions at the stage of building operation. *Prospects of Science*. 2025;3(186):72-76. (In Russ.)
26. Danilina N.V., Solntseva L.N. Geomodeling of the Consequences of Flooding of Urbanized Territories during Climate Change: The Case of the Republic of Karelia. *Bulletin of Eurasian Science*. 2025;17(1). (In Russ.)
27. Kabakova S.I. *Urban Planning Assessment of Urban Territories*. Moscow: Stroyizdat; 1971. 153 p. (In Russ.)
28. Sibrikova M.A. Traffic Patterns in Chelyabinsk. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture*. 2008;12(112):8-12. (In Russ.)
29. Romm A.P. Mathematical and modeling foundations of a comprehensive assessment and functional zoning of urban territories. *Assessment Issues*. 1997;4:2-11. (In Russ.)
30. Zharnikov V.B., Van A.V., Nikolaeva O.N. Taking into account the ecological functions of the lithosphere in assessing territories. *News of Higher Educational Institutions. Geodesy and Aerial Photography*. 2012;2-1:151-153. (In Russ.)
31. Zadvorneva E.P. Improving the methodology for a comprehensive assessment of the spatial development of the Astana agglomeration. *Innovative Economics*. 2021;4(29):69-79. (In Russ.)
32. Ermakova Yu.I., Kochurov B.I. Natural-landscape, historical and urban planning factors in the development of Khabarovsk. *South of Russia: Ecology, Development*. 2022;17(3):153-162. (In Russ.)
33. Yablokov V.M. Geoinformation analysis of the structure and dynamics of the natural and ecological framework of Moscow based on open geodata. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*. 2018;1(1):42-48. (In Russ.)
34. Sereke T.E., Bratkov V.V., Tesfay T. Analysis of land use and land surface temperature based on satellite images of the city of Mendefera. *Bulletin of SSUGiT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2024;29(5):69-79. (In Russ.)

35. Krivoguz D.O., Zakharova Yu.B. Application of geospatial analysis in forecasting the ecological and economic development of the Kerch Peninsula. *Geoinformatics*. 2018;1:52-55. (In Russ.)
36. Metaxas T. Mega projects and sustainable city image: evidence from the Nuevo Norte Project of Madrid. *International Journal of Urban Sustainable Development*. 2024;16(1):108-128. URL: <https://doi.org/10.1080/19463138.2024.2327318>
37. Zhao L., Jiaying L., Qinglong S. Evaluation of urban comprehensive carrying capacity: a case study of the Beijing–Tianjin–Hebei urban agglomeration, China. *Springer Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature*. 2020;:19774-19782.
38. Li B., Guan M., Zhan L., Liu C., Zhang Z., Jiang H., Zhang Y., Dong G. Urban comprehensive carrying capacity and development order: "A pressure-capacity-potential" logical framework. *Frontiers in Environmental Science*. 2022;10. doi:10.3389/fenvs.2022.935498
39. Zaykova E.Yu. Hybrid models of the first group and green infrastructure: methods of sustainable integration. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*. 2024;2(46):26-41. (In Russ.)
40. Giyasov A.I. The importance of the urban heat island in regulating the micro- and ecoclimate. *Bulletin of SUSU. Construction and Architecture Series*. 2023;23(1):5-15. (In Russ.)
41. Kattsov V.M., editor. *Report on Climate Risks in the Russian Federation*. St. Petersburg; 2017. 106 p. (In Russ.)
42. Makarov I.A., Chernokulsky A.V. The Impact of Climate Change on the Russian Economy: Ranking of Regions by Adaptation Needs. *Journal of the New Economic Association*. 2023;4(61):145-202. (In Russ.)
43. Sklyarenko G.Yu., Shekhurdin G.R. Features of the Thermal Field of Rostov-on-Don Based on Earth Remote Sensing Data. *News of Universities. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2024;1:97-104. (In Russ.)
44. Privalenko V.V., Bezuglova O.S. *Environmental issues of anthropogenic landscapes of the Rostov region. Volume 1. Urban ecology*. Rostov-on-Don: Publishing House of the SKNC HSE; 2003. 290 p. (In Russ.)
45. Merkulova K.A. *Engineering and geological conditions of Rostov-on-Don*. Rostov-on-Don: RSPU; 2006. 132 p. (In Russ.)
46. Fishkin M.V., editor. *Ecological Bulletin of the Don. On the state of the environment and natural resources of the Rostov region in 2023*. Rostov-on-Don: Publishing House of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Rostov Region; 2024. 369 p. (In Russ.)
47. Sheina S.G., Fedorovskaya A.A., Larin N.S. Smart Building Technologies for Adaptation to Climate Change. *Housing Construction*. 2025;6:25-30. (In Russ.)
48. Tribelskaya E.G., Tursunbaeva T.Zh. Modern Practice of Designing Low-Carbon Cities. *System Technologies*. 2021;38:155-166. (In Russ.)
49. Medvedeva L.S., Zemlyakova N.S. Diagnostics of the Socio-Demographic Security of a Region. *Scientific Almanac of the Black Sea Countries*. 2025;11(1):13-21. (In Russ.)
50. Dispatching "Crystal". Official website of the SDK "Crystal". URL: <http://www.sdk-kristall.ru/> (In Russ.)

#### Информация об авторах

##### **Федоровская Альбина Ахмедовна**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство»  
E-mail: bina-87@mail.ru.

##### **Умнякова Нина Павловна**

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», г. Москва, Россия, д-р. техн. наук., заместитель директора по науке  
E-mail: n.umniakova@mail.ru

##### **Скасырская Юлия Александровна**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия, студент кафедры «Городское строительство и хозяйство»  
E-mail: daha.skos5555@gmail.com

##### **Шенна Светлана Георгиевна**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону, Россия, д-р. техн. наук., проф., заведующая кафедрой «Городское строительство и хозяйство»  
E-mail: rgsu-gsh@mail.ru.

**Information about authors**

**Fedorovskaya Albina Akhmedovna**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Don State Technical University”, Rostov-on-Don, Russia,  
Ph.D. in Engineering, Assoc. Prof., Associate Professor of the Department of “Urban Construction and Economy”  
E-mail: bina-87@mail.ru.

**Umnyakova Nina Pavlovna**

Federal State Budgetary Institution “Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences”, Moscow, Russia,  
Dr. in Engineering. sciences, deputy director for science  
E-mail: n.umniakova@mail.ru

**Skasyrskaya Yulia Aleksandrovna**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Don State Technical University", Rostov-on-Don, Russia,  
student of the Department of "Urban Construction and Economy"  
E-mail: daha.skos5555@gmail.com

**Sheina Svetlana Georgievna**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Don State Technical University", Rostov-on-Don, Russia,  
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of "Urban Construction and Economy"  
E-mail: [rgsu-gsh@mail.ru](mailto:rgsu-gsh@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 03.08.2025  
Одобрена после рецензирования 21.09.2025  
Принята к публикации 01.02.2026

The article was submitted 03.08.2025  
Approved after reviewing 21.09.2025  
Accepted for publication 01.02.2026

А.В. АЛЕКСАНИН<sup>1</sup>, К.В. ЛЮБАВИНА<sup>2</sup><sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия**ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МАТЕРИАЛОЕМКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ВОЗВОДИМЫХ МЕТОДАМИ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Аннотация:* Внедрение аддитивных технологий в строительную отрасль ведет к технологическому обновлению всего строительного комплекса. Строительная 3D-печать формирует принципиально новый подход не только к производственным процессам, но и к самой архитектуре, открывая новые, беспрецедентные возможности. Обладая значительным потенциалом для оптимизации процессов и снижения материалоемкости, аддитивное производство открывает перспективы для устойчивого развития высокоэффективного строительства. Несмотря на растущий интерес к аддитивным технологиям, вопросы их комплексной оценки и оптимального применения требуют дальнейшего изучения. Особую актуальность приобретает системный анализ теплотехнических характеристик строительных конструкций, создаваемых методами 3D-печати. Статья посвящена актуальной проблеме оптимизации строительных конструкций, возводимых методами аддитивного производства. Несмотря на увеличение распространения 3D-печати в строительстве, комплексное исследование взаимосвязи геометрических параметров, теплотехнических характеристик и материалоемкости остается недостаточно изученным. Целью работы является оценка влияния ключевых геометрических параметров на эксплуатационные и ресурсные показатели ограждающих конструкций. В исследовании применялась комплексная методика, сочетающая параметрическое моделирование с последующим теплотехническим анализом. Были рассмотрены три различные конфигурации стеновых элементов с синусоидальной геометрией, варьируемые по толщине стенки и количеству синусоид. Практическая значимость работы заключается в разработке принципов проектирования оптимальных строительных конструкций для аддитивного производства, позволяющих одновременно достигать снижения материалоемкости и улучшения энергоэффективности. Полученные результаты представляют ценность для дальнейшего развития устойчивого строительства и оптимизации ресурсопотребления в строительной отрасли.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, строительная 3D-печать, тепловая эффективность, энергоэффективность, материалоемкость

A. V. ALEKSANIN<sup>1</sup>, K. V. LYUBAVINA<sup>2</sup><sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), MGSU, Moscow, Russia<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), MGSU, Moscow, Russia**THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS ON THERMAL CHARACTERISTICS AND MATERIAL CAPACITY OF BUILDING STRUCTURES CONSTRUCTED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHODS**

**Abstract.** *The integration of additive technologies into the construction industry is driving a technological renewal of the entire building sector. Construction 3D printing is creating a fundamentally new approach, not only to manufacturing processes but also to architecture itself, unlocking unprecedented new possibilities. With significant potential for process optimization and reducing material consumption, additive manufacturing opens up prospects for the sustainable development of high-performance construction. Despite the growing interest in additive technologies, the issues surrounding their comprehensive assessment and optimal application require further study. A systematic analysis of the thermal performance characteristics of building structures created by 3D printing methods is becoming particularly relevant. This article addresses the pressing problem of optimizing building structures constructed using additive manufacturing methods. Despite the increasing prevalence of 3D printing in construction, a comprehensive investigation into the relationship between geometric parameters, thermal performance characteristics, and material consumption remains insufficiently studied. The aim of this work is to evaluate the influence of key geometric parameters on the operational performance and resource efficiency of building envelopes. The study employed a comprehensive methodology combining parametric modeling with subsequent thermal performance analysis. Three different configurations of wall elements with sinusoidal geometry were examined, varying in wall thickness and the number of sinusoids. The practical significance of this work lies in developing design principles for optimizing building structures intended for additive manufacturing, enabling a simultaneous reduction in material consumption and improvement in energy efficiency. The results obtained are valuable for the further development of sustainable construction and the optimization of resource consumption in the building industry.*

**Keywords:** *additive technologies, 3D construction printing, thermal efficiency, energy efficiency.*

## 1. Введение

Внедрение аддитивных технологий оказало трансформационное воздействие на строительный комплекс, существенно расширив потенциал смежных направлений - от архитектурного искусства до инжиниринга и, непосредственно, строительного производства [1]. Увеличение объемов инвестиций в 3D-печать подтверждает, что ее широкое распространение — это лишь вопрос времени. Рост числа специализированных компаний обусловлен высокой инновационностью метода, который радикально трансформирует устоявшиеся технологические цепочки [2]. Таким образом, технологическое превосходство аддитивных процессов над традиционными становится ключевым фактором их растущей конкурентоспособности [3,4].

Аддитивные технологии дарят архитектуре свободу форм, позволяя воплощать в жизнь самые сложные параметрические оболочки. Уникальные задумки обретают реальность благодаря послойной печати, которая управляется точными компьютерными алгоритмами [5,6]. Разнообразие доступного оборудования, от порталных систем до роботизированных манипуляторов, позволяет гибко адаптировать технологию под задачи конкретного проекта [7]. Разработка специализированных строительных смесей - от быстросхватывающихся бетонов до составов с фиброй и полимерами - обеспечивает необходимые эксплуатационные характеристики возводимых конструкций [8].

Фундаментальные исследования в области строительной 3D-печати охватывают как разработку новых материалов, так и оценку их практического применения. С одной стороны, ведутся интенсивные работы по созданию и изучению свойств специализированных составов, включая цементные смеси [9], бетоны на цементном вяжущем [10] и геополимеры [11], что позволяет целенаправленно формировать требуемые эксплуатационные характеристики конструкций. С другой стороны, комплексный анализ реальных проектов, таких как строительство полноценных домов, демонстрирует не только технологическую осуществимость метода, но и его значительные преимущества с точки зрения снижения воздействия на окружающую среду [12] и экономической эффективности [13, 14].

Для укрепления конкурентоспособности аддитивных технологий на строительном рынке ключевым условием является обеспечение научно-технического сопровождения их устойчивого развития. Несмотря на увеличивающийся объем исследований в области 3D-печати, комплексный анализ её производственного цикла и сравнительная оценка

энергоэффективности и материалоемкости на фоне традиционных процессов остаются без должного внимания.

Количество реализованных проектов с применением 3D-печати неуклонно растет. В условиях повышенного внимания к экологии и энергоэффективности данные технологии становятся ключевым инструментом достижения целей «зеленого» строительства. Аддитивное производство предлагает комплекс преимуществ, включая свободу в создании сложных геометрических форм и возможность оптимизировать заполнение внутренних полостей в конструкциях, что в совокупности ведет к значительному снижению расхода материалов [15].

Многочисленные исследования посвящены сравнительному анализу строительной 3D-печати и традиционных методов. Ряд работ особо подчеркивает критическую важность выбора печатного материала, обусловленную требованиями к теплотехническим свойствам ограждающих конструкций [16,17]. Анализ научных публикаций выявил противоречие: в случае монолитной печати конструктивная надежность напечатанного бетона возрастает с усложнением его геометрии, тогда как при использовании технологии печати опалубок-оболочек максимальная эффективность достигается, напротив, за счет упрощения форм. При этом аспект влияния геометрической сложности на общие теплотехнические показатели ограждающих конструкций остается практически не изученным.

## 2. Модели и методы

Исследование проводилось на основе анализа работы принтера типа XYZ (см. рисунок 1) со стандартной бетонной смесью для аддитивных работ. В качестве объекта исследования была выбрана синусоидальная геометрия стенки, в рамках которой варьировались толщина и взаимное расположение слоев. Изменения тепловых показателей отслеживались с помощью методологии анализа жизненного цикла (LCA). К анализу был принят принтер компании AMT S300 стандартной модификации, параметры печати принтера приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Параметры печати.

Диаметр сопла [мм]	40-60
Мощность [кВт]	1
Скорость печати [мм/с]	100
Потребление энергии [Вт·ч/кг]	1,67



Рисунок 1 - Строительный 3D принтер козлового типа XYZ

Процесс монолитной 3D-печати происходит непосредственно на строительной площадке, где ограждающие конструкции возводятся как единое целое. Ключевое преимущество метода - отсутствие необходимости изготовления и монтажа множества отдельных элементов. Каждый этаж формируется за один непрерывный цикл печати, ограниченный лишь рабочим полем порталной системы.

Портальный принтер представляет собой каркасную конструкцию с экструзионной головкой, перемещающейся по осям XYZ. Для его обслуживания требуется операторская группа из 4-5 человек. Особые требования предъявляются к печатающей смеси: её состав, включающий пластификаторы, должен обеспечивать оптимальную текучесть для экструзии и достаточную вязкость для сохранения формы каждого слоя. Примечательно, что приготовление смеси осуществляется непосредственно на строительной площадке.

После выбора типа печатающей установки следующим этапом является проектирование геометрической конфигурации ограждающих конструкций. Для достижения эффекта удлинения пути теплового потока и повышения конструктивной прочности было применено синусоидальное взаиморасположение внутренних стенок. Образованные в результате такого подхода полости подлежат заполнению теплоизоляционным материалом.

Для сравнительного анализа различных вариантов в среде Rhino с использованием программного обеспечения Grasshopper разработана общая параметрическая модель. Модель позволяет генерировать весь спектр требуемых конфигураций путем вариации четырех ключевых параметров: количества синусоид (NS), толщины стенки (T), а также ее длины (X) и ширины (Y) (рисунок 2).

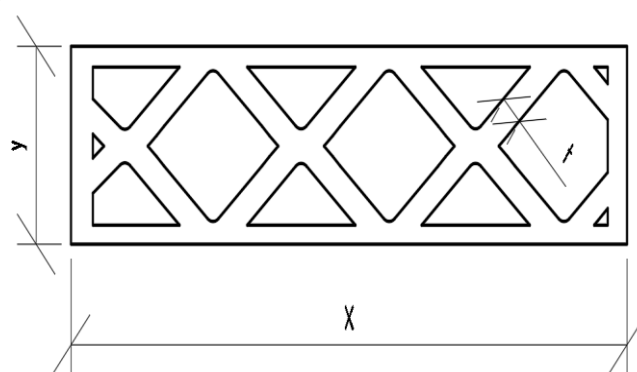


Рисунок 2 - Геометрические параметры анализируемой модели

Базовыми параметрами модели были приняты: толщина стенки - 40 мм, длина насадки - 60 мм и общая длина элемента - 100 мм. Вариация количества и протяженности внутренних синусоид достигается за счет корректировки толщины слоя и длины насадки соответственно. Для проведения сравнительного анализа геометрические конфигурации были выделены три основные модели: M1 — с одной синусоидой, M2 — с двумя синусоидами, и M2.1 с двумя синусоидами, но увеличенной толщиной стенки (рисунок 3).

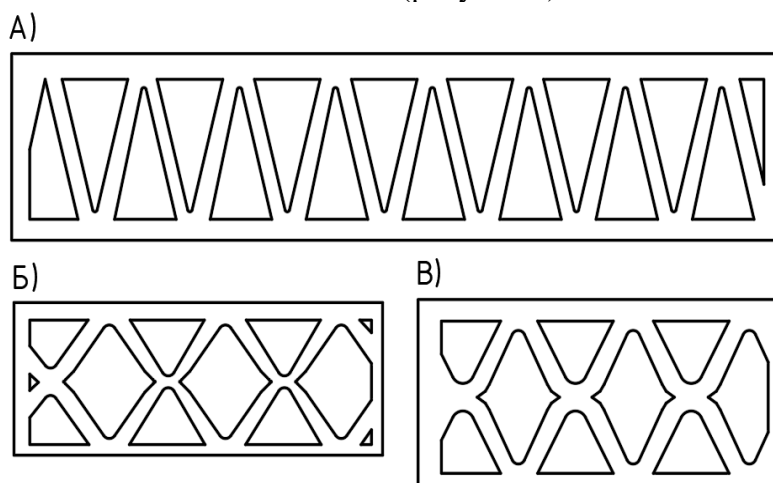


Рисунок 3 – Геометрические модели конфигурации: А – модель с одной синусоидой (M1); Б – модель с двумя синусоидами (M2); В – модель с двумя синусоидами, но увеличенной толщиной стенки (M2.1)

Коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций, при выполнении конструктивных требований, можно скорректировать за счет вариации двух ключевых

параметров 3D-печати: толщины стенок и уровня геометрической сложности. Эти параметры, в свою очередь, непосредственно определяют расход материала и время печати, что необходимо учитывать при количественной оценке. В данном исследовании сравнительный анализ проводился для элементов оболочки с идентичным коэффициентом теплопередачи, что соответствует требованию стандарта ГОСТ Р ИСО 14040—2022 о необходимости обеспечения единых количественных характеристик при сопоставлении различных сценариев.

Методология включала разработку параметрического алгоритма, генерирующего конфигурации на основе заданных критериев. Для расчета коэффициента теплопередачи полученных сечений использовалось интегрирование с программным комплексом THERM, реализующим метод конечных элементов. Данный подход позволил осуществлять итеративное изменение геометрии в режиме прямого взаимодействия с оценкой ее теплотехнических свойств.

Решение задачи было выполнено в три этапа:

1. Параметризация геометрических характеристик элементов. Для проведения анализа было выбрано 3 различных конфигурации элементов ограждающих конструкций. При моделировании образцов изменялись не только общая толщина элемента, варьируемыми параметрами стали также толщина слоя и количество синусоид.

2. Определение тепловых параметров исследуемых элементов. В качестве материала для печати была выбрана печатающая смесь с теплопроводностью 0,28 Вт/(мК). В качестве материала для заполнения ячеек был выбран изоляционный материал на основе целлюлозного волокна с теплопроводностью 0,04 Вт/(мК).

3. Итеративный термический анализ каждой из трех конфигураций элементов. Анализ был выполнен на основе параметрической модели, к которой был применен алгоритм термического анализа с использованием базы Grasshopper на основе программного обеспечения THERM (рисунок 4).

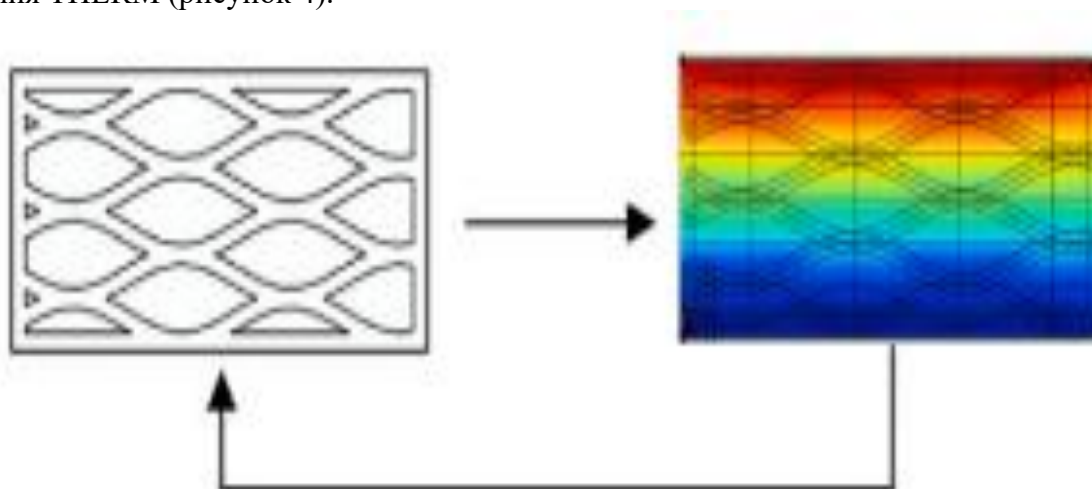


Рисунок 4 - Схематичный анализ данных конфигурации модели

Единый критерий - идентичные тепловые характеристики - позволил объективно оценить корреляцию между расходом материала и конструктивной сложностью, выявив тем самым как перспективные преимущества, так и ограничения применяемой технологии. Данные по трем элементам и их параметрам отражены в таблице 2. За функциональную единицу исследования принята секция наружной ограждающей стены здания со средним коэффициентом теплопередачи от 0,28 до 0,29 Вт/м<sup>2</sup>·К.

Таблица 2 - Сводная таблица параметров трех анализируемых элементов конфигурации

№ модели	Толщина стенки, (см)	Число синусоид, (шт)	X, (см)	Y, (см)	Коэффициент теплопередачи, (Вт/(м <sup>2</sup> ·К))
M1	6	1	100	49	0,29
M2	4	2	100	40	0,28
M2.1	6	2	100	51	0,29

Параметры материалов для моделей задавались с учетом использования суперпластификаторов, добавок для регулирования вязкости, а также полипропиленовых волокон. В анализе применялся бетон плотностью 2,30 т/м<sup>3</sup>. Вес бетона и изоляционного материала для каждой конфигурации был принят на основе моделирования, которые в свою очередь принимаются по включенным базам данных.

### 3. Результаты исследования и их анализ

В рамках оценки теплотехнических характеристик для достижения нормируемого сопротивления теплопередаче была оптимизирована геометрия элементов: за счёт увеличения толщины стенки и числа синусоид. Это решение позволило значительно удлинить путь теплового потока и, как следствие, снизить общую толщину конструкции при сохранении её высоких теплоизоляционных свойств. Основные результаты моделирования по трем анализируемым элементам отражены в таблице 3. В результате исследования установлено, что наиболее эффективной конструкцией является модель №M2, которая имеет наименьшую массу (441,8 кг) и при этом достигает лучшего (наименьшего) коэффициента теплопередачи (0,28 Вт/(м<sup>2</sup>·К)). Это указывает на успешную оптимизацию: удалось снизить вес и улучшить теплоизоляционные характеристики одновременно.

Таблица 3 - Результаты теплотехнического моделирования, на основании нормируемого коэффициента теплопередачи

№ Модели	Масса элемента, кг			Геометрические параметры элементов				
	Всего	Бетон	Изоляц ия	Толщина стенки, (см)	Число синусо ид, (шт)	X, (см)	Y, (см)	Коэффициент теплопередачи, (Вт/(м <sup>2</sup> ·К))
№M1	620,5	609,9	10,6	6	1	100	49	0,29
№M2	<b>441,8</b>	<b>431,6</b>	<b>10,2</b>	4	2	100	40	0,28
№M2.1	688,3	678,0	10,3	6	2	100	51	0,29

В ходе исследования также проведён сравнительный анализ материалоемкости рассматриваемых геометрических моделей. Установлено, что использование порталной системы для монолитной 3D-печати объективно приводит к повышенному расходу бетонной смеси. Ключевыми факторами, определяющими объём затрачиваемого материала, являются толщина стенки и количество синусоид, формирующих её внутреннюю конфигурацию. Результаты моделирования подтверждают данную зависимость: для достижения заданного коэффициента теплопередачи необходимо увеличение диаметра сопла и числа синусоид, а также требуется увеличение толщины стенки (рисунок 5). Это, в свою очередь, приводит к увеличению массы конструкции и росту её ударной вязкости. Следовательно, с экологической точки зрения, приоритетными являются решения с более тонкими стенами и упрощенной геометрией, характеризующиеся меньшей материалоемкостью.

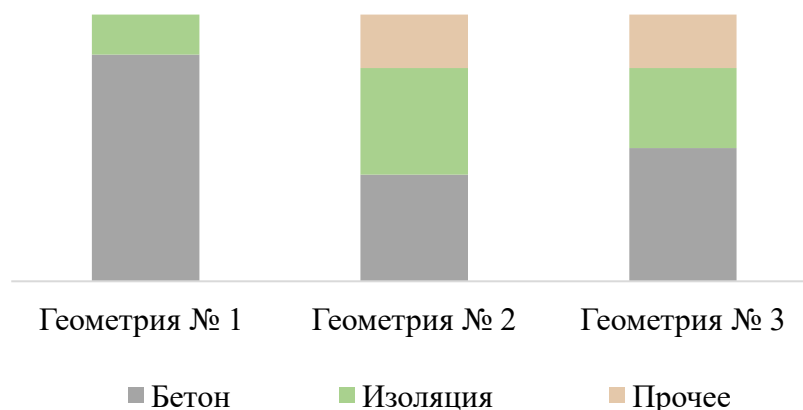


Рисунок 5 - Соотношение материалов для всех конфигураций анализа

Повышение экологичности бетонных смесей может быть достигнуто за счет замены портландцемента на альтернативные вяжущие, такие как геополимерный бетон. Дальнейшее снижение воздействия на окружающую среду возможно при использовании полипропиленовой фибры из переработанных материалов.

#### 4. Заключение

1. Проведенное исследование демонстрирует значительное влияние геометрических параметров на теплотехнические характеристики и материалоемкость строительных конструкций, возводимых методами аддитивного производства. Сравнительный анализ трех конфигураций с идентичными требованиями к теплоизоляции выявил существенные различия в их массе и расходе материалов.

2. Ключевым результатом работы стало выявление оптимальной конфигурации (Модель М2), сочетающей минимальную массу (441,8 кг) с наилучшим коэффициентом теплопередачи (0,28 Вт/м<sup>2</sup>·К). Этот результат подтверждает гипотезу о возможности одновременного улучшения энергоэффективности и снижения материалоемкости за счет целенаправленной геометрической оптимизации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галишникова В.В., Коренева А.И. Техничко-экономическое сравнение строительства зданий с применением аддитивной и традиционной технологий производства. *Строительное производство*. 2025. № 2. С. 118-127.
2. Петросян Р.С., Абрегов М.А. Перспективы внедрения аддитивных технологий при проведении капитального ремонта многоквартирных жилых домов (МКД). *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2024. С. 255-259.
3. Титов Г.А. Материалы для аддитивных технологий в строительстве. *Инженерные исследования*. 2022. № 3 (8). С. 38-49.
4. Сулейманова Л.А., Огнев Н.В. Оценка возведения стен здания с помощью 3d-принтера в сравнении с традиционным строительством из бетонных блоков. *Университетская наука*. 2017. № 2 (4). С. 13-15.
5. Красных С.С., Шапошников А.В. Использование технологии 3d-печати при строительстве малоэтажных зданий. *Техника и технологии строительства*. 2025. № 1 (41). С. 45-51.
6. Kazemian A., Yuan X., Meier R., Khoshnevis B. Performance-Based Testing of Portland Cement Concrete for Construction-Scale 3D Printing. In *3D Concrete Printing Technology*, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 2: 13–35. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00002-6
7. Hambach M., Rutzen M., Volkmer D. Properties of 3D-Printed Fiber-Reinforced Portland Cement Paste. In *3D Concrete Printing Technology*, 1st ed.; Sanjayan J. G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 5: 73–113. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00005-1
8. Nam Y.J., Hwang Y.K., Park J.W., Lim Y.M. Fiber-Reinforced Cementitious Composite Design with Controlled Distribution and Orientation of Fibers Using Three-Dimensional Printing Technology. In *3D Concrete Printing Technology*, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 4: 59–72. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00004-X

9. Sanjayan J.G., Nematollahi B. 3D Concrete Printing for Construction Applications. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 1: 1–11. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00001-4
10. Feng P., Meng X., Chen J.F., Ye L. Mechanical Properties of Structures 3D-Printed With Cementitious Powders. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 9: 181–209. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00009-9
11. Xia M., Nematollahi B., Sanjayan J.G. Properties of Powder-Based 3D Printed Geopolymers. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 13: 265–280. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00013-0
12. Abdalla, H., Parvez Fattah, K., Abdallah, M., Tamimi, A.K., Tajani, F., Locurcio, M., Di Liddo, F., 2021. Environmental footprint and economics of a full-scale 3D-printed house, 2021 Sustainability 13, 11978. <https://doi.org/10.3390/SU132111978>, 11978 13.
13. Берсенева М.Л., Клиндух Н.Ю., Данченко Т.В., Якшина А.А. Экономическая эффективность аддитивных технологий в строительной отрасли. Вестник евразийской науки. 2020. Т 12. №1. С. 3.
14. Тиньков С.А., Нарезная Т.К. Использование строительного 3d принтирования для решения жилищных проблем населения. Экономика и предпринимательство. 2021. № 6 (131). С. 1261-1265.
15. В.П. Грахов, С.А. Мохначев, О.В. Бороздов. Влияние развития 3D-технологий на экономику строительства // Фундаментальные исследования. – 2014. – 11–12: 2673–2676. DOI:10.18720/CUBS.63.4
16. Gaudillière N., Duballet R., Bouyssou C., Mallet A., Roux Ph., Zakeri M., Dirrenberger J. Building Applications Using Lost Formworks Obtained Through Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 3: 37–58. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00003
17. Cao X., Li Z. Factors Influencing the Mechanical Properties of Three-Dimensional Printed Products From Magnesium Potassium Phosphate Cement Material. In 3D Concrete Printing Technology, 1st ed.; Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands. 2019: 10: 211–222. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00010-5

## REFERENCES

1. Galishnikova V.V., Koreneva A.I. Technical and economic comparison of building construction using additive and traditional production technologies. *Construction Production*. 2025;2:118-127. (rus.)
2. Petrosyan R.S., Abregov M.A. Prospects for the implementation of additive technologies in the overhaul of apartment buildings (AB). *Bulletin of Tula State University. Technical Sciences*. 2024;:255-259. (rus.)
3. Titov G.A. Materials for additive technologies in construction. *Engineering Research*. 2022;3(8):38-49. (rus.)
4. Suleymanova L.A., Ognev N.V. Evaluation of building walls using a 3d printer in comparison with traditional construction of concrete blocks. *University Science*. 2017;2(4):13-15. (rus.)
5. Krasnykh S.S., Shaposhnikov A.V. Use of 3d printing technology in the construction of low-rise buildings. *Technique and Construction Technologies*. 2025;1(41):45-51. (rus.)
6. Kazemian A., Yuan X., Meier R., Khoshnevis B. Performance-Based Testing of Portland Cement Concrete for Construction-Scale 3D Printing. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:2:13-35. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00002-6
7. Hambach M., Rutzen M., Volkmer D. Properties of 3D-Printed Fiber-Reinforced Portland Cement Paste. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:5:73-113. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00005-1
8. Nam Y.J., Hwang Y.K., Park J.W., Lim Y.M. Fiber-Reinforced Cementitious Composite Design with Controlled Distribution and Orientation of Fibers Using Three-Dimensional Printing Technology. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:4:59-72. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00004-X
9. Sanjayan J.G., Nematollahi B. 3D Concrete Printing for Construction Applications. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:1:1-11. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00001-4
10. Feng P., Meng X., Chen J.F., Ye L. Mechanical Properties of Structures 3D-Printed With Cementitious Powders. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:9:181-209. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00009-9
11. Xia M., Nematollahi B., Sanjayan J.G. Properties of Powder-Based 3D Printed Geopolymers. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:13:265-280. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00013-0
12. Abdalla H., Parvez Fattah K., Abdallah M., Tamimi A.K., Tajani F., Locurcio M., Di Liddo F. Environmental footprint and economics of a full-scale 3D-printed house. *Sustainability*. 2021;13:11978. doi:10.3390/SU132111978.

- Berseneva M.L., Klindukh N.Yu., Danchenko T.V., Yakshina A.A. Economic efficiency of additive technologies in the construction industry. *Bulletin of Eurasian Science*. 2020;12(1):3. (rus.)
13. Tinkov S.A., Narezhnaya T.K. The use of construction 3d printing to solve housing problems of the population. *Economics and Entrepreneurship*. 2021;6(131):1261-1265. (rus.)
  14. Grakhov V.P., Mokhnachev S.A., Borozdov O.V. The Impact of 3D Technology Development on the Construction Industry. *Fundamental Research*. 2014;11-12:2673-2676. doi:10.18720/CUBS.63.4 (rus.)
  15. Gaudillière N., Duballet R., Bouyssou C., Mallet A., Roux Ph., Zakeri M., Dirrenberger J. Building Applications Using Lost Formworks Obtained Through Large-Scale Additive Manufacturing of Ultra-High-Performance Concrete. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:3:37-58. doi:10.1016/B978-0-12-815481-6.00003-8
  16. Cao X., Li Z. Factors Influencing the Mechanical Properties of Three-Dimensional Printed Products From Magnesium Potassium Phosphate Cement Material. In: Sanjayan J.G., Nazari A., Nematollahi B., eds. *3D Concrete Printing Technology*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier; [date unknown].
  17. , The Netherlands. 2019: 10: 211–222. DOI:10.1016/B978-0-12-815481-6.00010-5

#### Информация об авторах

##### **Александр Александр Вячеславович**

НИУ МГСУ (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет), г.Москва, Россия, доцент, к.т.н., доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, E-mail: AleksaninAV@mgsu.ru

##### **Любавина Ксения Валерьевна**

НИУ МГСУ (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет), студентка, E-mail: Lyubavin.19682@gmail.com

#### Information about authors

##### **Aleksanin Aleksandr V.**

NRU MGSU (National Research Moscow State University of Civil Engineering), Moscow, Russia, Associate Professor, PhD, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, E-mail: AleksaninAV@mgsu.ru

##### **Lyubavina Ksenia V.**

NRU MGSU (National Research Moscow State University of Civil Engineering), student, E-mail: Lyubavin.19682@gmail.com

Статья поступила в редакцию 30.10.2025  
Одобрена после рецензирования 23.01.2026  
Принята к публикации 01.02.2026

The article was submitted 30.10.2025  
Approved after reviewing 23.01.2026  
Accepted for publication 01.02.2026

В.С. КОВАЛЬЧУК<sup>1</sup><sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия

## ВЛИЯНИЕ ФУЛЛЕРЕНОВОЙ САЖИ НА СВОЙСТВА ТАМПОНАЖНЫХ СМЕСЕЙ

***Аннотация.** Разработка цементных составов для повышения качества конструкции является одним из основных направлений в строительном материаловедении. Согласно анализу существующих исследований, использование углеродсодержащих добавок для повышения характеристик цементных смесей противоречиво и сильно зависит от доступности добавки и технического задания. Описан механизм взаимодействия углеродного модификатора с вяжущими материалами. Представлен минеральный и фазовый состав используемого стандартного тампонажного портландцемента. В статье рассмотрено влияние добавки в виде фуллереновой сажи на структурно-реологические свойства цементного теста. Рентгенофазовый состав модифицированных цементов зафиксировал отсутствие химического взаимодействия углеродной добавки с продуктами гидратации цемента. Полученные результаты физико-механических испытаний показали рост прочности цементного камня при твердении в условиях нормальных и умеренных температур. С помощью компьютерной томографии были рассчитаны показатели объема порового пространства и пористости образцов. Установлено оптимальное содержание фуллереновой добавки для повышения характеристик цементного состава. Представленное исследование предлагает одно из возможных решений проблемы разработки тампонажного материала для повышения герметичности и долговечности скважин.*

***Ключевые слова:** цементирование скважин, прочность, пористость, углеродная добавка, фуллереновая сажа, тампонажная смесь.*

V.S. KOVALCHUK<sup>1</sup><sup>1</sup>Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia

## EFFECT OF FULLERENE SOOT ON THE PROPERTIES OF GROUTING MIXTURES

***Abstract.** The development of cement mixtures to enhance the quality of construction is a major focus in the field of building materials research. Based on an analysis of existing literature, the use of carbon-based additives to improve the properties of cement pastes is contradictory and strongly depends on the availability of the additive and the technical specification. Moreover, the mechanism of interaction of a carbon modifier with binding materials is described. The mineral and phase composition of the standard grouting Portland cement used is presented. The article considers the effect of a fullerene soot additive on the structural and rheological properties of cement paste. The X-ray phase content of the modified cements revealed the absence of chemical interaction of the carbon additive with the cement hydration products. The analysis of the physical and mechanical tests showed an increase in the strength of the cement stone during curing at normal and moderate temperatures. Computed tomography was used to calculate the parameters of the pore volume and porosity of the samples. As a result, the optimal concentration of fullerene additives was established to enhance the characteristics of the cement composition. The presented study proposes one of the possible solutions to the challenge of developing a grouting material that enhances the tightness and longevity of wells.*

***Keywords:** well cementing, strength, porosity, carbon additive, fullerene soot, grouting mixture.*

## 1. Введение

Цементирование играет решающую роль при обеспечении безопасной эксплуатации конструкций различного назначения. Тампонажный портландцемент применяется при строительстве нагнетательных, водозаборных, инженерно-геологических и других видов скважин. Однако, в процессе затвердевания тампонажный материал находится в нестабильном состоянии, отличным от гидратации цемента при нормальных условиях. Для решения проблемы неточности экспериментальных тестов используются исследования в условиях, максимально приближенных к реальным. Кроме того, для улучшения свойств цементного теста и камня используются специальные добавки, которые регулируют необходимые параметры в соответствии с требованиями эксперимента. Существуют добавки, которые улучшают структурно-реологические свойства, а также повышают прочность цементного камня, делая его более устойчивым к механическим нагрузкам [1, 2]. Кроме того, химические и минеральные добавки регулируют процесс гидратации, водопоглощения и пенообразования [3-5]. Несмотря на интенсивное строительство и широкий ассортимент материалов на рынке, проблема обеспечения качественного крепления скважин остаётся одной из ключевых задач для исследователей и инженеров.

Активное развитие углеродных материалов указывает на перспективность применения их в качестве добавок в строительные материалы [6-9]. Одним из перспективных наноразмерных модификаторов строительных материалов является углеродная добавка с высоким содержанием фуллеренов [10, 11]. Фуллеренами называют углеродные кластеры с четным, более 20, количеством атомов углерода. Молекула  $C_{60}$  обладает наибольшей стабильностью и активно применяется в промышленности чаще всего в виде фуллереновой сажи (ФС) [12, 13]. При модифицировании цементных составов ФС происходит улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств цемента и бетона за счет ускорения процесса гидратации портландцемента, улучшения микроструктуры и уменьшения пористости цементного камня [14]. В работе [15] были представлены результаты исследований, которые показали улучшение физико-механических свойств цементного камня с добавкой фуллереновой сажи 0,01 мас.%. Более того, пористость цементного камня с ФС снизилась, а также обнаружено улучшение прочности в разное время отверждения, морозостойкости, водопоглощения и водостойкости бетона. В ходе проведения исследований [16] было установлено, что прочность, достигаемая в бетоне с концентрацией фуллероидов в воде более 0,01 мас.%, по экономическим показателям не может представлять интереса для промышленности и строительства. Согласно полученным данным [17-19] использование фуллероидных углеродных наночастиц оказало положительное влияние не только на морозостойкость и водонепроницаемость, но и увеличило сопротивляемость бетона агрессивному воздействию внешней среды. Авторами было определено, что фуллероидные углеродные наночастицы не вызывают образование новых фаз вещества, отличных от имеющихся, но положительно влияют на кинетику процесса гидратации и способствуют углублению процессов твердения цементного камня, характеризующегося повышенной плотностью и однородностью. В статье [20] отмечено уменьшение количества технологических дефектов конструкции при внедрении фуллереновых нанодобавок в бетонные смеси при постоянном водоцементном отношении. Результаты показали, что прочность повышается до 10-15%, водонепроницаемость возрастает на 2-3 ступени, а морозостойкость - на 1-3 марки.

Для изучения влияния добавок на свойства цементных составов помимо исследований по стандартным нормативам ученые часто используют дополнительные эксперименты по определению специальных свойств материалов. Так, активное применение получили средства анализа поровой структуры цементного камня. Изучение влияния пористости бетона авторами [21] показало, что равномерное распределение пустот повышает прочность на сжатие за счёт минимизации концентрации напряжений. В статье [22] было исследовано влияние характеристик пор на свойства пенобетона. Результаты рентгеновской компьютерной

томографии показали, что форма, размеры пор и значение плотности твердых частиц сильно влияют на разрушаемость бетона. С увеличением коэффициента пустотности уменьшается толщина стенок пор и снижается прочность цементных композитов [23].

Анализ мировых исследований, посвящённых использованию фуллеренсодержащих материалов в качестве добавок в бетоны, композиты и цементы, показал положительное влияние углеродного наномодификатора на физико-механические и эксплуатационные свойства цементного камня. Фуллереновые добавки позволяют повысить свойства цементных смесей в широком диапазоне. Однако, отмечается, что применение фуллереновой сажи не всегда является экономически целесообразным и технически возможным. Более того, на сегодняшний день не развито применение фуллеренсодержащих модификаторов в качестве добавок в составы тампонажных смесей для цементирования скважин.

Цель работы – проведение экспериментальных исследований для определения перспектив внедрения фуллереновой сажи в составы тампонажных смесей для строительства скважин в условиях нормальных и умеренных температур.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: проведение экспериментальных исследований влияния фуллереновой сажи на реологические и прочностные свойства тампонажной смеси; определение влияния добавки фуллереновой сажи на пористость цементного камня; подбор оптимального количества добавки для получения цементного теста/камня с улучшенными эксплуатационными свойствами; оценка перспектив внедрения фуллеренового наномодификатора в составы тампонажных смесей для строительства скважин.

## 2. Модели и метод

При проведении экспериментальных исследований использовался стандартный тампонажный материал ПЦТ-I-50. Тампонажный портландцемент изготавливается в соответствии с требованиями ГОСТ 1581-2019, в котором регулируется содержание в клинкере оксида магния не более 5,0 мас.% и оксида серы (VI) в пределах 1,5-3,5 мас.%. Подробный состав клинкера представлен на рисунке 1. Углеродной добавкой выбрана фуллереновая сажа, полученная с помощью дугового разряда с графитовыми электродами и содержащая до 10 мас.% молекул C<sub>60</sub> и C<sub>70</sub> [24-26].

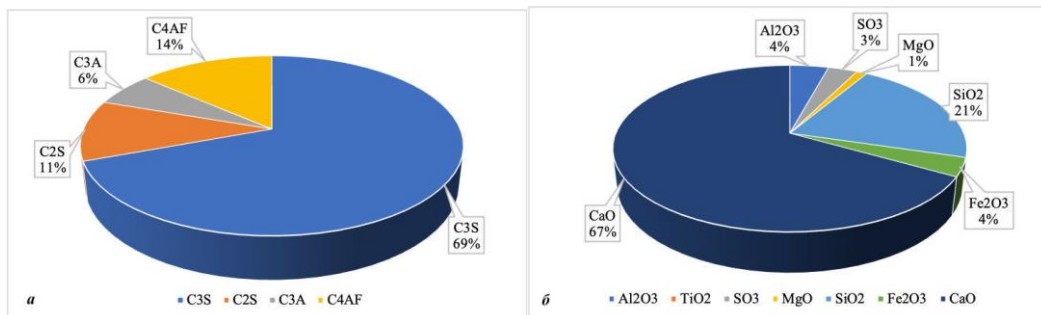


Рисунок 1 – Минеральный (а) и фазовый (б) состав вяжущего

Исследования строительных материалов осуществлялись согласно действующего норматива ГОСТ 34532-2019. Для элементного анализа фуллереновой сажи использовался рентгенофлуоресцентный спектрометр Shimadzu XRF1800. Также проводилась порошковая рентгеновская дифрактометрия на установке Shimadzu XRD-7000 для определения фазового состава цементного камня с добавкой ФС и компьютерная томография образцов для измерения открытой, закрытой и общей пористости, а также объема соответствующих пор с помощью рентгеновского микротомографа SkyScan 1173.

## 3. Результаты и анализ исследования

По результатам количественного анализа было определено, что 99% фуллереновой сажи состоит из углерода, а среди примесей наибольшее количество занимают фосфор, железо и кальций. Подробный элементный состав примесей ФС приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Элементный состав примесей фуллереновой сажи

Элемент	P	Fe	Ca	S	Si	Ti	K	Na	Cl	Al
Содержание, %	29,34	21,01	19,36	7,61	5,49	4,54	2,74	2,46	2,24	1,90

После приготовления цементного теста с содержанием фуллереновой сажи 0,1...0,5 мас.% измерялись структурно-реологические параметры, включающие плотность, растекаемость, время загустевания до 30 Вс и водоотделение. В таблице 2 представлены нормативные требования к тампонажным составам, а также показатели исследований цементных смесей, модифицированных фуллереновой сажей 0,1...0,5 мас.%.

Таблица 2 – Результаты реологических исследований цементных составов

Состав	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Растекаемость, мм	Время загустевания до 30 Вс, мин	Водоотделение, мл
ГОСТ 34532-2019	-	≥ 200	≥ 90	≤ 8,7
ФС 0,1 мас.%	1,86	215	340	2,1
ФС 0,3 мас.%	1,86	210	320	1,9
ФС 0,5 мас.%	1,85	200	300	1,8

В соответствии с полученными данными, добавление фуллереновой сажи до 0,5 мас.% удовлетворяет всем стандартным требованиям и является практически применимым. Для исследования влияния механических нагрузок и температуры твердения 70 °С в течение первых суток образцы тампонажных составов измерялись на прессе на изгиб через 2 суток и на одноосное сжатие через 1, 3 и 10 дней. Согласно полученным данным постепенное увеличение добавки ФС 0,1...0,5 мас.% приводит к стабильному росту прочности на изгиб на 5,5-10,9%. При твердении в условиях умеренных температур для аналогичных составов прочность растет на 3,5-10,5% относительно образцов, твердеющих при нормальной температуре. Изменение прочности на одноосное сжатие цементных составов после твердения при 22±2°С и 70°С отображено на рисунке 2.

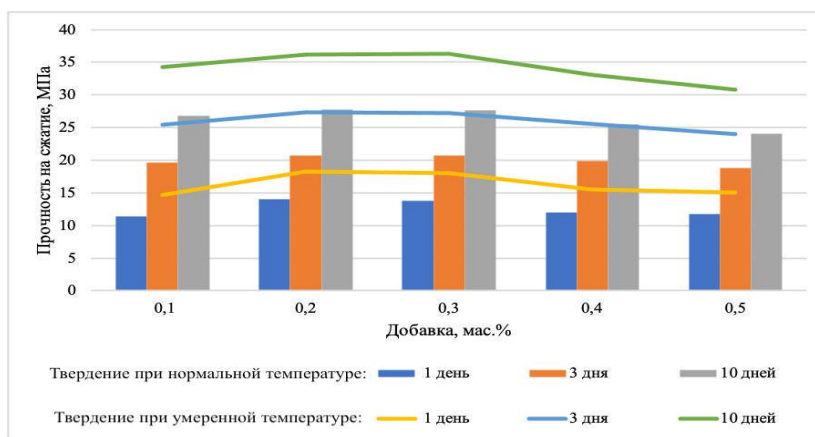


Рисунок 2 – Диаграмма изменения прочностина сжатие образцов цементного камня

Эксперименты по изучению физико-механических свойств цементного камня указывают на положительное влияние фуллереновой сажи в объеме 0,2-0,3 мас.%. Углеродная армирующая добавка регулирует свойства тампонажной смеси для цементирования скважин в условиях нормальных и умеренных температур. При температуре 70°С процесс гидратации ускоряется, поэтому наблюдается рост прочности до ~31% по сравнению с образцами, твердеющими при температуре 22±2°С.

Для дальнейшего детального изучения механизма взаимодействия фуллереновой сажи с вяжущим был проведен фазовый анализ и компьютерная томография цементного камня. Было решено использовать оптимальную дозировку 0,3 мас.% фуллереновой сажи для определения эффекта добавки на химические и физические свойства строительного материала

на основе тампонажного портландцемента. В таблице 3 представлен фазовый химический состав образцов.

Таблица 3 – Химический состав исследуемых образцов цементного камня

Добавка ФС, мас. %.	Химическая фаза					
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
б/д	52,412	41,842	4,621	0,501	0,193	0,362
0,3	47,988	19,554	2,947	3,042	1,696	0,672

Согласно результату теста, наблюдается уменьшения содержания основных химических элементов цементного камня, а именно CaO, SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В то же время происходит значительное увеличение содержания оксида железа, что указывает на возможный рост запаса прочности цемента. В таблице 4 приведены результаты расчета показателей пористости цементного камня.

Таблица 4 – Пористость образцов цементного камня

Показатель	Добавка ФС, мас. %.	
	б/д	0,3
Объем закрытых пор, мм <sup>3</sup>	8,57	3,57
Объем открытого порового пространства, мм <sup>3</sup>	1,37	0,27
Общий объем порового пространства, мм <sup>3</sup>	9,94	3,84
Закрытая пористость, %	1,14	1,04
Открытая пористость, %	0,18	0,13
Общая пористость, %	1,32	1,17

Результаты исследований показали незначительное изменение химического состава наряду с резким снижением объема порового пространства на ~61%. Таким образом, фуллереновая сажа при структурообразовании цементного камня, не образуя химических связей, заполняет свободное пространство и является уплотняющим материалом. Значительное изменения объема закрытых и открытых пор цементного камня еще раз подтверждает утверждение об уплотнении структуры цементного камня, модифицированного фуллереновой сажой. Изменение пористости цементного камня при добавлении ФС наглядно представлено на компьютерном снимке на рисунке 3.

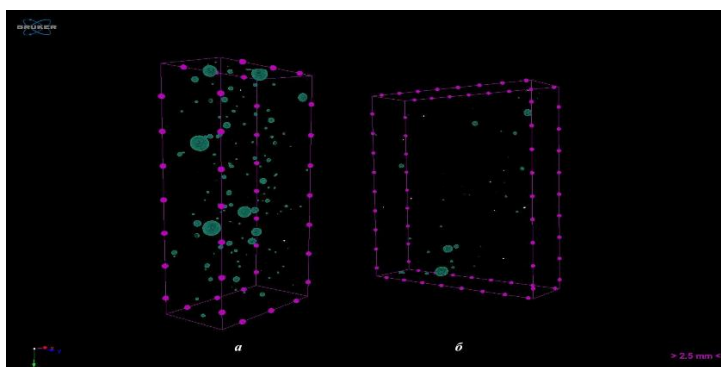


Рисунок 3 – Модель порового пространства образцов цементного камня:  
а) без добавок; б) ФС 0,3 мас. %

#### 4. Заключение

1. Анализ экспериментальных результатов модификации тампонажных смесей на основе ПЦТ-I-50 фуллереновой сажой 0,1...0,5 мас. % показал незначительное влияние на реологию цементного теста, одновременно с ростом прочности на одноосное сжатие и снижением объема пор.

2. Уменьшение пористости также положительно влияет на проницаемость, трещиностойкость и контракцию цемента, повышая однородность материала. Эти характеристики являются ключевыми для качественной изоляции ствола скважины, предотвращая негативное влияние окружающей среды.

3. Определено, что микроармирование цементного камня происходит до момента сбалансированного количества добавки, внедренной в свободное поровое пространство структуры цементной матрицы. При повышенных объемах модификатора структурно-реологические и физико-механические свойства тампонажной смеси снижаются и появляется необходимость внедрения добавок, например, пластификаторов для повышения подвижности смеси.

4. Для цементирования затрубного пространства скважины в условиях нормальных и умеренных температур оптимальное количество добавки фуллереновой сажи для комплексного улучшения свойств тампонажного состава составило 0,2-0,3 мас. %.

5. Фуллереновая сажа имеет высокий потенциал в качестве армирующей нанодобавки для получения цементного камня высокой прочности и низкой пористости без понижения требуемых реологических характеристик цементного теста.

Таким образом, результаты исследования демонстрируют перспективность использования фуллереновой сажи в качестве добавки в тампонажные смеси, что, в свою очередь, способствует повышению эффективности и долговечности скважины.

Целью последующего исследования является проведение более детальных физико-химических исследований взаимодействия фуллереновой сажи с вяжущим для обоснования механизма взаимодействия нанодобавки с частицами цемента и воды. Кроме того, в план работы включено изучение взаимодействия фуллереновой сажи с другими модификаторами в составе цементной смеси, а также определение влияния температуры и давления на эксплуатационные характеристики цементного теста и камня.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taiwo A. S., Ayre D. S., Khorami M., Rahatekar S. S. Assessment of the Mechanical and Microstructural Performance of Waste Kraft Fibre Reinforced Cement Composite Incorporating Sustainable Eco-Friendly Additives // *Buildings*. 2024. Vol. 14 (9). Article No. 2725. DOI: 10.3390/buildings14092725
2. Lima V. N., Skadsem H. J., Beltrán-Jiménez K., Velloso R. Q., de Andrade Silva, F. The effect of PVA microfiber reinforcement on the mechanical and rheological behavior of class G oil well cement pastes // *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 391. Article No. 131806. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131806
3. Roli A., Joel O., John A. Effect of Silica Flour and Potassium Chloride as Additives in the Rheological Properties of High Temperature High Pressure Gas Well Cement Slurry // *Journal of Engineering Research and Reports*. 2023. Vol. 25. P. 66-78. DOI: 10.9734/jerr/2023/v25i4903
4. Chen W., Wang C., Yao X., Song W., Zou Y. Effect of a 2-Acrylamido-2-methylpropanesulfonic Acid-Based Fluid Loss Additive on the Hydration of Oil Well Cement // *ACS Omega*. 2024. Vol. 9 (8). P. 9090-9097. DOI: 10.1021/acsomega.3c07890
5. Tang L., Fořt J., Černý R., He Z. Sustainable Utilization of Modified Electrolytic Manganese Residue as a Cement Retarder: Workability, Mechanical Properties, Hydration Mechanisms, Leaching Toxicity, and Environmental Benefits // *Buildings*. 2025. Vol. 15 (10). Article No. 1586. DOI: 10.3390/buildings15101586
6. Cai J., Wang M., Zhou S., Cheng X. Mechanical Properties of Graphite-Oil Well Cement Composites under High Temperature // *ACS Omega*. 2022. Vol. 7 (16). P. 14148-14159. DOI: 10.1021/acsomega.2c00717
7. Li M., Meng F., Guo X. Y. Mechanical Properties and Mechanism of Graphite Oxide Reinforced Oil Well Cement // *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 847. P. 445-450. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.847.445
8. Qian Z., Luan C., Yu, C., Huang Y., Zhou Z. Mechanisms of carbon black in multifunctional cement matrix: Hydration and microstructure perspectives // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 346. Article No. 128455. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128455
9. Sammer T., Nasiri A., Kostoglou N., Ravi K., Raith J. Insight into Carbon Black and Silica Fume as Cement Additives for Geoenery Wells: Linking Mineralogy to Mechanical and Physical Properties // *C*. 2024. Vol. 10 (3). Article No. 71. DOI: 10.3390/c10030071
10. Yunusov F., Larionova T. V., Tolochko O., Breki A. D. Tribological Properties of Al-Based Composites Reinforced with Fullerene Soot // *Materials*. 2021. Vol. 14 (21). Article No. 6438. DOI: 10.3390/ma14216438
11. Zeynalov E. B., Allen N. S., Magerramova M. Ya., Huseynov A. B. Evaluation of the antioxidative efficacy of fullerene soot doped by C<sub>60</sub>/C<sub>70</sub> (85/15) for low-density/high pressure polyethylene nanocomposites // *Azerbaijan Chemical Journal*. 2024. Vol. 4. P. 18-26. DOI: 10.32737/0005-2531-2024-4-18-26
12. Шпилевский Э. Фуллерены – новые молекулы для новых материалов // *Наука и инновации*. 2006. №5 (39). С. 32-38.
13. Daniel G. B., Nachimuthu K., Nallasivam J. L. Functionalization of [C<sub>60</sub>] – Fullerene: A Recent Update // *Cemistry - An Asian Journal*. 2025. Vol. 20 (9). Article No. e202401800. DOI: 10.1002/asia.202401800
14. Urkhanova L. A., Lkhasaranov S. A., Buyantuev S. L. Modification of cement and concrete with carbon nanomaterials, obtained by plasma method // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9 (1). P. 652-656.

15. Урханова Л. А., Лхасаранов С. А., Буянтуев С. Л., Кузнецова А. Ю. О влиянии углеродных наноматериалов на свойства цемента и бетона // *Нанотехнологии в строительстве*. 2016. №8 (5). С. 16-41. DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-5-16-41
16. Пухаренко Ю. В., Аубакирова И. У., Никитин В. А., Летенко Д. Г., Староверов В. Д. Модифицирование цементных композитов смешанным наноуглеродным материалом фуллероидного типа // *Технологии бетонов*. 2013. №12 (89). С. 13-15.
17. Пухаренко Ю. В., Староверов В. Д., Рыжов Д. И. Фуллероидные углеродные наночастицы для модификации бетонов // *Технологии бетонов*. 2015. № 3-4 (104-105). С. 40-43.
18. Рыжов Д. И. Особенности изменения фазового состава цемента, модифицированного углеродными наночастицами, в процессе гидратации // *Вестник гражданского инженерства*. 2016. №6 (59). С. 141-146.
19. Пухаренко Ю. В., Рыжов Д. И., Староверов В. Д. Особенности структурообразования цементных композитов в присутствии углеродных наночастиц фуллероидного типа // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. №7 (106). С. 718-723. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.718-723
20. Пухаренко, Ю. В., Староверов В. Д., Рыжов Д. И. Наномодифицированные добавки в бетоны для транспортного строительства // *Транспорт Российской Федерации*. 2014. №5 (54). С. 26-30.
21. Abou-Nouh F., Afraitane H., Farah M., Jaafri R. The Effects of Particle Radius, Porosity, and Void Distribution on the Compressive Strength of Cellular Concrete // *Construction Materials*. 2025. Vol. 5 (1). Article No. 15. DOI: 10.3390/constrmater5010015
22. Chung S-Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore Characteristics and Their Effects on the Material Properties of Foamed Concrete Evaluated Using Micro-CT Images and Numerical Approaches // *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7 (6). Article No. 550. DOI: 10.3390/app7060550
23. Mia M. S., Medepalli S., Takahashi Y., Tsuchiya K., Ishida T. Effect of microstructure differences on the thermal and mechanical behaviors of porous cementitious composites using phase change materials // *Journal of Intelligent Construction*. 2025. Vol. 3 (1). Article No. 9180076. DOI: 10.26599/JIC.2025.9180076
24. Werner H., Herein D., Blöcker J., Henschke B., Tegtmeyer, U., Schedel-Niedrig Th., Keil M., Bradshaw A. M., Schlögl R. Spectroscopic and chemical characterisation of “fullerene black” // *Chemical Physics Letters*. 1992. Vol. 194. P. 62-66. DOI: 10.1016/0009-2614(92)85743-T
25. Alekseyev N. I., Dyuzhev G. A. Fullerene formation in an arc discharge // *Carbon*. 2003. Vol. 41 (7). P. 1343-1348. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00058-7
26. Kushch S. D., Kuyunko N. S. Fullerene black: Structure, properties and possible applications // *Russian Journal of General Chemistry*. 2011. Vol. 81. P. 345-353. DOI: 10.1134/S1070363211020113

## REFERENCES

1. Taiwo A. S., Ayre D. S., Khorami M., Rahatekar S. S. Assessment of the Mechanical and Microstructural Performance of Waste Kraft Fibre Reinforced Cement Composite Incorporating Sustainable Eco-Friendly Additives. *Buildings*. 2024. Vol. 14 (9). Article No. 2725. DOI: 10.3390/buildings14092725
2. Lima V. N., Skadsem H. J., Beltrán-Jiménez K., Velloso R. Q., de Andrade Silva, F. The effect of PVA microfiber reinforcement on the mechanical and rheological behavior of class G oil well cement pastes. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 391. Article No. 131806. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131806
3. Roli A., Joel O., John A. Effect of Silica Flour and Potassium Chloride as Additives in the Rheological Properties of High Temperature High Pressure Gas Well Cement Slurry. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2023. Vol. 25. Pp. 66-78. DOI: 10.9734/jerr/2023/v25i4903
4. Chen W., Wang C., Yao X., Song W., Zou Y. Effect of a 2-Acrylamido-2-methylpropanesulfonic Acid-Based Fluid Loss Additive on the Hydration of Oil Well Cement. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9 (8). Pp. 9090-9097. DOI: 10.1021/acsomega.3c07890
5. Tang L., Fořt J., Černý R., He Z. Sustainable Utilization of Modified Electrolytic Manganese Residue as a Cement Retarder: Workability, Mechanical Properties, Hydration Mechanisms, Leaching Toxicity, and Environmental Benefits. *Buildings*. 2025. Vol. 15 (10). Article No. 1586. DOI: 10.3390/buildings15101586
6. Cai J., Wang M., Zhou S., Cheng X. Mechanical Properties of Graphite-Oil Well Cement Composites under High Temperature. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7 (16). Pp. 14148-14159. DOI: 10.1021/acsomega.2c00717
7. Li M., Meng F., Guo X. Y. Mechanical Properties and Mechanism of Graphite Oxide Reinforced Oil Well Cement. *Materials Science Forum*. 2016. Vol. 847. Pp. 445-450. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.847.445
8. Qian Z., Luan C., Yu, C., Huang Y., Zhou Z. Mechanisms of carbon black in multifunctional cement matrix: Hydration and microstructure perspectives. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 346. Article No. 128455. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128455
9. Sammer T., Nasiri A., Kostoglou N., Ravi K., Raith J. Insight into Carbon Black and Silica Fume as Cement Additives for Geoenery Wells: Linking Mineralogy to Mechanical and Physical Properties. *C*. 2024. Vol. 10 (3). Article No. 71. DOI: 10.3390/c10030071
10. Yunusov F., Larionova T. V., Tolochko O., Breki A. D. Tribological Properties of Al-Based Composites Reinforced with Fullerene Soot. *Materials*. 2021. Vol. 14 (21). Article No. 6438. DOI: 10.3390/ma14216438
11. Zeynalov E. B., Allen N. S., Magerramova M. Ya., Huseynov A. B. Evaluation of the antioxidative efficacy of fullerene soot doped by C<sub>60</sub>/C<sub>70</sub> (85/15) for low-density/high pressure polyethylene nanocomposites. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2024. Vol. 4. Pp. 18-26. DOI: 10.32737/0005-2531-2024-4-18-26
12. Shpilevsky E. Fullereny – novye molekuly dlya novykh materialov [Fullerenes are new molecules for new materials] *Nauka i innovacii [Science and Innovation]*. 2006. Vol. 5 (39). Pp. 32-38. (rus).

13. Daniel G. B., Nachimuthu K., Nallasivam J. L. Functionalization of [C<sub>60</sub>] – Fullerene: A Recent Update. *Cemistry - An Asian Journal*. 2025. Vol. 20 (9). Article No. e202401800. DOI: 10.1002/asia.202401800
14. Urkhanova L. A., Lkhasaranov S. A., Buyantuev S. L. Modification of cement and concrete with carbon nanomaterials, obtained by plasma method. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. Vol. 9 (1). Pp. 652-656.
15. Urkhanova L. A., Lkhasaranov S. A., Buyantuev S. L., Kuznetsova A. Yu. O vliyaniy uglerodnykh nanomaterialov na svoystva cementa i betona [About the influence of carbon nanomaterials on the properties of cement and concrete]. *Nanotehnologii v stroitel'stve [Nanotechnologies in Construction]*. 2016. Vol. 8. No. 5. Pp. 16-41. (rus). DOI: 10.15828/2075-8545-2016-8-5-16-41
16. Pukharenko Yu. V., Aubakirova I. U., Nikitin V. A., Letenko D. G., Staroverov V. D. Modifitsirovanie tsementnykh kompozitov smeshannym nanouglerodnym materialom fulleroidnogo tipa [Modifying of cement composites the mixed nano-carbon material of fulleroid type]. *Tekhnologii betonov [Concrete Technologies]*. 2013. Vol. 12 (89). Pp. 13-15. (rus).
17. Pukharenko Yu. V., Staroverov V. D., Ryzhov D. I. Fulleroidnye uglerodnye nanochasticy dlya modifikatsii betonov [Fulleroid carbon nano particles for concrete]. *Tekhnologii betonov [Concrete Technologies]*. 2015. Vol. 3-4 (104-105). Pp. 40-43. (rus).
18. Ryzhov D. I. Osobennosti izmeneniya fazovogo sostava cementa, modifitsirovannogo uglerodnymi nanochasticami, v processe gidratsii [Features of changing the phase composition of cement modified with carbon nanoparticles in the course of hydration]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]*. 2016. Vol. 6 (59). Pp. 141-146. (rus).
19. Pukharenko Yu. V., Ryzhov D. I., Staroverov V. D. Osobennosti strukturoobrazovaniya tsementnykh kompozitov v prisutstvii uglerodnykh nanochastits fulleroidnogo tipa [Peculiar Properties of Structural Formation of Cement Composites in the Presence of Fulleroid Type Carbon Nanoparticles]. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*. 2017. Vol. 12. No. 7 (106). Pp. 718-723. (rus). DOI: 10.22227/1997-0935.2017.7.718-723
20. Pukharenko Yu. V., Staroverov V. D., Ryzhov D. I. Nanomodifitsirovannye dobavki v betony dlya transportnogo stroitel'stva [Nano-modified additives in concrete for transport construction]. *Transport Rossivskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*. 2014. Vol. 5(54). Pp. 26-30. (rus).
21. Abou-Nouh F., Afraitane H., Farah M., Jaafri R. The Effects of Particle Radius, Porosity, and Void Distribution on the Compressive Strength of Cellular Concrete. *Construction Materials*. 2025. Vol. 5 (1). Article No. 15. DOI: 10.3390/constrmater5010015
22. Chung S-Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore Characteristics and Their Effects on the Material Properties of Foamed Concrete Evaluated Using Micro-CT Images and Numerical Approaches. *Applied Sciences*. 2017. Vol. 7 (6). Article No. 550. DOI: 10.3390/app7060550
23. Mia M. S., Medepalli S., Takahashi Y., Tsuchiya K., Ishida T. Effect of microstructure differences on the thermal and mechanical behaviors of porous cementitious composites using phase change materials. *Journal of Intelligent Construction*. 2025. Vol. 3 (1). Article No. 9180076. DOI: 10.26599/JIC.2025.9180076
24. Werner H., Herein D., Blöcker J., Henschke B., Tegtmeier, U., Schedel-Niedrig Th., Keil M., Bradshaw A. M., Schlögl R. Spectroscopic and chemical characterisation of “fullerene black”. *Chemical Physics Letters*. 1992. Vol. 194. Pp. 62-66. DOI: 10.1016/0009-2614(92)85743-T
25. Alekseyev N. I., Dyuzhev G. A. Fullerene formation in an arc discharge. *Carbon*. 2003. Vol. 41 (7). Pp. 1343-1348. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00058-7
26. Kushch S. D., Kuyunko N. S. Fullerene black: Structure, properties and possible applications. *Russian Journal of General Chemistry*. 2011. Vol. 81. Pp. 345-353. DOI: 10.1134/S1070363211020113

#### Информация об авторе

##### Ковальчук Влада Станиславовна

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, соискатель.

E-mail: kovalchuk.vsk@gmail.com

#### Information about authors

##### Kovalchuk Vlada S.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia, PhD Student

E-mail: [kovalchuk.vsk@gmail.com](mailto:kovalchuk.vsk@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 22.08.2025  
 Одобрена после рецензирования 23.11.2025  
 Принята к публикации 01.02.2026

The article was submitted 22.08.2025  
 Approved after reviewing 23.11.2025  
 Accepted for publication 01.02.2026

**РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ТАМРАЗЯНА А.Г.  
«ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ»:  
учебное пособие для обучающихся по направлениям подготовки 08.05.01-  
Строительство уникальных зданий и сооружений - Москва: Издательство МИСИ –  
МГСУ. 2025.- 360 с.**

Проектирование и строительство высотных зданий есть комплекс сложных архитектурно-технических задач, для решения которых требуется всесторонний учет различных условий, влияющих на выбор объемно-пространственного решения здания, его несущих конструкций, инженерных систем и оборудования.

Проектирование высотных зданий требует комплексного подхода, при этом необходимо, чтобы различные инженерные специальности и профессии были эффективно взаимосвязаны с самого начала проекта. Этот междисциплинарный подход распространяется на все этапы проектирования и строительства здания.

Учебное пособие содержит 14 глав, в которых освещены и рассмотрены вопросы, связанные со стратегией проектирования, фундаментах, противопожарной безопасностью, анализом конструктивных систем и элементов зданий, нагрузок и воздействий, в том числе ветровые, сейсмические, представлены численные исследования при расчете высотных зданий, рассмотрены поведения материалов и конструкций при длительном действии нагрузок, а также, что стоит отдельно подчеркнуть, даны практические рекомендации по особенностям проектирования высотных зданий.

Подробно рассмотрены конструктивные системы высотных зданий, рассмотрены вопросы, связанные с комфортом проживания, методам гашения колебаний от ветровых воздействий, антисейсмических мероприятий, в частности, демпфированием.

Учебное пособие богато иллюстрировано примерами знаковых высотных зданий из железобетона, их характеристик.

Учебное пособие написано грамотным, техническим языком. Представлены ссылки на современные российские и зарубежные источники, современную нормативную базу.

Учебное пособие вышло в свет в издательстве МИСИ – МГСУ.



*С.И. Меркулов, д.т.н., профессор, чл.-корр. РААСН,  
заведующий кафедрой «Промышленное и гражданское строительство»  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Курский государственный университет».*

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

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

**В тексте статьи** не рекомендуется применять:

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

**Обязательные элементы:**

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

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

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

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

**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. Орёл, 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. Орёл, ул. Московская, 77.  
+79065704999

<http://oreluniver.ru/science/journal/sir>  
E-mail: str\_and\_rek@mail.ru

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

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

Подписано в печать 25.02.2026 г.  
Дата выхода в свет 19.03.2026  
Формат 70×108/16. Печ. л. 14,6  
Цена свободная. Тираж 500 экз.  
Заказ № 28

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